

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CAMPUS ITUMBIARA
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO



Henrique Borges Fernandes

CONTROLE DE VELOCIDADE EM UMA LINHA DE AR UTILIZANDO MICROCONTROLADOR

Itumbiara/GO
2022

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Henrique Borges Fernandes

Matrícula: 20171040100159

Título do Trabalho: Controle de velocidade em uma linha de ar utilizando microcontrolador

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

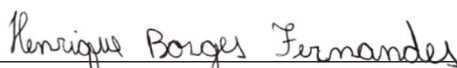
- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Itumbiara - GO, 25/07/2022.



Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autora

Henrique Borges Fernandes

CONTROLE DE VELOCIDADE EM UMA LINHA DE AR UTILIZANDO MICROCONTROLADOR

Trabalho de conclusão de curso apresentado a banca avaliadora como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação junto ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG), Câmpus Itumbiara.

Orientador: Dr. Giovani Aud Lourenço

Coorientador: Dr. Victor Régis Bernardeli

Área de conhecimento: Automação Eletrônica de Processos Elétricos e Industriais

Itumbiara/GO
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

F363c Fernandes, Henrique Borges
 Controle de velocidade em uma linha de ar utilizando
 microcontrolador. / Henrique Borges Fernandes. -- Itumbiara,
 2022.
 60 p. : il. color.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de
Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Goiás, Câmpus Itumbiara, 2022.

Orientador: Prof. Dr. Giovani Aud Lourenço.

Coorientador: Prof. Dr. Victor Régis Bernardeli.

1. Automação industrial. 2. Microcontroladores. 3. Transporte
pneumático. I. Título. II. Lourenço, Giovani Aud. III. Instituto
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

CDD 629.8

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Biblioteca Maria Gabriela Pacheco Pardey / Câmpus Itumbiara
Bibliotecário: Eduardo Pereira Resende CRB1/3266

Henrique Borges Fernandes

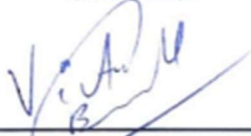
CONTROLE DE VELOCIDADE EM UMA LINHA DE AR UTILIZANDO MICROCONTROLADOR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca avaliadora, como parte dos requisitos para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Controle e Automação junto ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG), Câmpus Itumbiara.

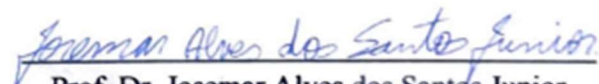
Aprovado em 11 de julho de 2022.



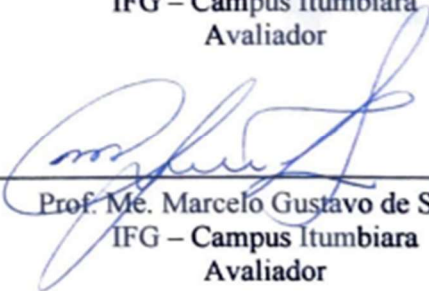
Prof. Dr. Giovani Aud Lourenço
IFG – Câmpus Itumbiara
Orientador



Prof. Dr. Victor Régis Bernardelli
IFG – Câmpus Itumbiara
Coorientador



Prof. Dr. Josemar Alves dos Santos Junior
IFG – Câmpus Itumbiara
Avaliador



Prof. Me. Marcelo Gustavo de Souza
IFG – Câmpus Itumbiara
Avaliador

Itumbiara/GO
2022

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus, por ter permitido que eu tivesse saúde e determinação para não desanimar durante a realização deste trabalho e fazer com que meus objetivos fossem alcançados.

Aos meus pais Adriano Borges da Silva e Janaina Fernandes de Jesus Silva, a minha família, assim como minha namorada Érica Rost, por todo o apoio e pela ajuda, que muito contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao meu orientador e professor Dr. Giovani Aud Lourenço, por ter me apoiado e orientado nessa etapa, desempenhado tal função com dedicação e amizade.

Ao meu coorientador e professor Dr. Victor Régis Bernardeli, por ter contribuído para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas de turma, por compartilharem comigo tantos momentos de descobertas e aprendizado e por todo o companheirismo ao longo deste percurso.

Ao Instituto Federal de Goiás, que me acolheu e foi essencial no meu processo de formação pessoal e profissional, pela dedicação, e por tudo o que aprendi ao longo dos anos do curso.

RESUMO

Atualmente, processos automatizados tem se tornado cada vez mais indispensáveis, sejam eles para aumentar a produtividade, reduzir perdas ou garantir a qualidade de um processo ou produto. Na indústria, muitas aplicações necessitam do controle de velocidade, dentre as quais se destacam as operações de secagem e transporte pneumático. Em um secador a velocidade é muito importante no controle da taxa de secagem dos materiais enquanto nos transportadores pneumático em fase diluída existe uma velocidade mínima de transporte que se altera dependendo do material. Portanto, a utilização de controladores de velocidade se torna muito importante para alguns processos industriais, motivando muitas instituições de ensino a trabalharem com estes sistemas no sentido de proporcionar aos alunos atividades práticas que remetam a casos reais da indústria. Assim, o objetivo deste trabalho foi construir uma bancada experimental que permitisse aos usuários controlar a velocidade do ar em uma linha através de um ventilador centrífugo. Para isto, um supervisor foi desenvolvido no sentido de acompanhar em tempo real o controle do processo. Um pitot foi instalado no centro da tubulação, sendo os dados de velocidade medidos neste ponto. Constatou-se, como apresentado na literatura, que a instalação de um pitot no centro da tubulação é suficiente para determinação da velocidade média. Nos experimentos realizados foram definidas seis rotações do ventilador centrífugo (1688, 1990, 2300, 2620, 2945 e 3480 rpm) com o intuito de avaliar as diferenças nos perfis de velocidade, mas o que foi identificado é que para as condições experimentais estudadas não houve variação significativa. Assim, é possível concluir que para a faixa de velocidades estudadas, uma única equação para determinação da velocidade média é suficiente. Este estudo, portanto, confirma a facilidade em se determinar a vazão volumétrica do transporte de ar em dutos, haja vista a simplicidade em se determinar a velocidade média, principalmente quando se trata de escoamento em regime turbulento, com Re (Número de Reynolds) $> 9,6 \times 10^4$, em que os perfis de velocidade não sofrem diferenças significativas. A unidade experimental com o sistema de aquisição de dados e controle da velocidade de ar na linha atenderá aos cursos de Engenharia Elétrica e de Controle e Automação do Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara, contribuindo para melhoria do laboratório de processos industriais.

Palavras-chave: Fenômenos de Transporte, Microcontroladores, Transporte Pneumático, Controle de Velocidade.

Keywords: Transport Phenomena, Microcontrollers, Pneumatic Transport, Speed Control.

Currently, automated processes have become increasingly indispensable, whether they are to increase productivity, reduce losses or guarantee the quality of a process or product. In industry, many applications require speed control, among which drying and pneumatic conveying operations stand out. In a dryer, speed is very important in controlling the drying rate of materials, while in dilute phase pneumatic conveyors there is a minimum transport speed that changes depending on the material. Therefore, the use of speed controllers becomes very important for some industrial processes, motivating many educational institutions to work with these systems in order to provide students with practical activities that refer to real cases in the industry. Thus, the objective of this work was to build an experimental bench that would allow users to control the air speed in a line through a centrifugal fan. For this, a supervisor was developed in order to monitor the process control in real time. A pitot was installed in the center of the pipeline, and velocity data was measured at this point. It was found, as presented in the literature, that the installation of a pitot in the center of the pipe is sufficient to determine the average velocity. In the experiments carried out, six rotations of the centrifugal fan were defined (1688, 1990, 2300, 2620, 2945 and 3480 rpm) in order to evaluate the differences in the velocity profiles, but what was identified is that for the experimental conditions studied there was no significant variation. Thus, it is possible to conclude that for the range of speeds studied, a single equation to determine the average speed is sufficient. This study, therefore, confirms the ease of determining the volumetric flow of air transport in ducts, given the simplicity of determining the average velocity, especially when dealing with flow in a turbulent regime, with Re (Reynolds number) $> 9,6 \times 10^4$, in that the velocity profiles do not suffer significant differences. The experimental unit with the data acquisition and air velocity control system on the line will attend the Electrical Engineering and Control and Automation courses at the Federal Institute of Goiás, Campus Itumbiara, contributing to the improvement of the industrial process laboratory.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Medidor de engrenagens.....	16
Figura 2 - Medidor de paletas.....	16
Figura 3 - Pistão rotativo	16
Figura 4 - Anemômetros de concha	17
Figura 5 - Anemômetros de hélice	17
Figura 6 - Anemômetros de fio quente.....	17
Figura 7 - Orifício concêntrico, excêntrico e segmental	18
Figura 8 - Placa de orifício	18
Figura 9 - Tubo Venturi.....	19
Figura 10 - Pitot.....	20
Figura 11 - Instalação de sensores.....	21
Figura 12 - Retificador de fluxo de linha	21
Figura 13 - Perfil de velocidade de escoamento.....	22
Figura 14 - Controle PID de uma planta	23
Figura 15 - Resposta ao degrau unitário de uma planta	23
Figura 16 - Curva de resposta em forma de S	24
Figura 17 - Sistema de malha fechada com um controlador proporcional.....	24
Figura 18 - Oscilação sustentada com período P_{cr}	24
Figura 19 - PID Relay Autotuning Technique	25
Figura 20 - Unidade experimental.....	27
Figura 21 - Ventilador Centrifugo.....	27
Figura 22 - Pitot utilizado.....	28
Figura 23 - Sensor de Pressão Diferencial	28
Figura 24 - ESP32	29
Figura 25 - Faixa de tensão sugerida.....	30
Figura 26 - Duty cycle PWM	31
Figura 27 - Circuito para condicionar o sinal do sensor.....	33
Figura 28 - Curva de calibração	35
Figura 29 - Circuito conversor DAC	37
Figura 30 - Resposta circuito DAC 1 kHz	39
Figura 31 - Resposta circuito DAC 2 kHz	39
Figura 32 - Pontos para coleta das amostras	41
Figura 33 - Unidade experimental.....	42
Figura 34 - Circuito condicionador montado	43
Figura 35 - Interface de controle no LabView	44
Figura 36 - Média das amostras.....	46
Figura 37 - Ajustes de velocidade obtidos	47
Figura 38 - Resposta ao degrau	50
Figura 39 - Oscilação sustentada para $k=180$	51
Figura 40 - Resposta do Ajuste 1	53
Figura 41 - Resposta do Ajuste 4	54
Figura 42 - Resposta do Ajuste 2	55
Figura 43 - Resposta do Ajuste 3	56
Figura 44 - Teste 1: resposta do sistema à um degrau de setpoint	57
Figura 45 - Teste 2: resposta do sistema à um degrau de setpoint	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ziegler-Nichols Método de Resposta de Frequência.....	26
Tabela 2 - Ziegler-Nichols Método de Resposta ao Degrau.....	26
Tabela 3 - ADCs do ESP32	29
Tabela 4 - Comparativo dos valores do ADC com Vref	34
Tabela 5 - Resposta circuito DAC 1 kHz	38
Tabela 6 - Resposta circuito DAC 2 kHz	38
Tabela 7 - Média das amostras e seus desvios padrões	46
Tabela 8 - Perfil de velocidade e velocidade média em m/s.....	48
Tabela 9 - Ganhos PID pelo método de Ziegler-Nichols de Resposta ao Degrau.....	50
Tabela 10 - Ganhos PID pelo método Ziegler-Nichols de Resposta de Frequência	51
Tabela 11 – Melhores ajustes de ganhos PID obtidos	52

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
SP	<i>Setpoint</i> (Ponto de ajuste)
PV	<i>Process Value</i> (Valor de processo)
CV	<i>Control Value</i> (Valor de controle)
ADC	<i>Analogic to Digital Converter</i> (Conversor analógico para digital)
DAC	<i>Digital to Analog Converter</i> (Conversor digital para analógico)
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação de largura de pulso)
AO	<i>Amplificador Operacional</i>
PID	<i>Proportional Integral Derivative</i> (Proporcional Integral Derivativo)
SD	<i>Standard Deviation</i> (Desvio Padrão)

LISTA DE SÍMBOLOS

Pa	Pascal
kPa	Quilo Pascal
ρ	Densidade específica do ar em kg/m ³
ΔP	Diferença de pressão
V	<i>Voltz</i> (Tensão)
Hz	Hertz (Frequência)
Kp	ganho proporcional
Ti	ganho de tempo integral
Td	ganho de tempo derivativo
Ku	ganho proporcional crítico
Kcr	ganho proporcional crítico
Tu	período crítico
Pcr	período crítico
Tp	constante de tempo
T	constante de tempo
L	atraso ou tempo morto
τ	atraso ou tempo morto

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS.....	13
2.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	<i>13</i>
2.2	<i>Objetivos Específicos</i>	<i>13</i>
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1	<i>Medidores de deslocamento positivo.....</i>	<i>15</i>
3.2	<i>Medidores de velocidade.....</i>	<i>16</i>
3.3	<i>Medidores deprimogênios.....</i>	<i>17</i>
3.3.1	<i>Placa de orifício</i>	<i>17</i>
3.3.2	<i>Venturi.....</i>	<i>19</i>
3.3.3	<i>Pitot</i>	<i>19</i>
3.4	<i>Instalação mecânica de sensores</i>	<i>21</i>
3.5	<i>Determinação do perfil de velocidade do escoamento</i>	<i>21</i>
3.6	<i>Controle PID.....</i>	<i>23</i>
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
4.1	<i>Unidade Experimental.....</i>	<i>27</i>
4.2	<i>Ventilador Centrífugo.....</i>	<i>27</i>
4.3	<i>Pitot</i>	<i>28</i>
4.4	<i>Sensor de pressão diferencial.....</i>	<i>28</i>
4.5	<i>Microcontrolador.....</i>	<i>28</i>
4.5.1	<i>ADC do ESP32</i>	<i>29</i>
4.5.2	<i>PWM e DAC do ESP32</i>	<i>31</i>
4.6	<i>Sistema de Aquisição de Dados e Controle.....</i>	<i>32</i>
4.6.1	<i>Comunicação do sensor com o microcontrolador</i>	<i>32</i>
4.6.2	<i>Condicionamento do sinal gerado pelo sensor</i>	<i>32</i>
4.6.3	<i>Correção do ADC.....</i>	<i>33</i>
4.6.4	<i>Média das amostras.....</i>	<i>35</i>
4.6.5	<i>Comunicação entre microcontrolador e supervisorio</i>	<i>36</i>
4.6.6	<i>Comunicação entre supervisorio e inversor.....</i>	<i>36</i>
4.6.7	<i>Resposta do circuito DAC utilizado</i>	<i>38</i>
4.7	<i>Supervisorio</i>	<i>40</i>
4.8	<i>Determinação do perfil de velocidade de escoamento.....</i>	<i>40</i>
4.9	<i>Determinação dos parâmetros do controlador PID</i>	<i>41</i>
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1	<i>Unidade Didática</i>	<i>42</i>
5.2	<i>Circuito Projetado: Condicionador de Sinal.....</i>	<i>42</i>
5.3	<i>Supervisorio</i>	<i>43</i>
5.3.1	<i>Configuração do supervisorio.....</i>	<i>45</i>
5.4	<i>Determinação do perfil de velocidade.....</i>	<i>45</i>
5.5	<i>Ganhos de realimentação do controlador PID.....</i>	<i>49</i>
5.6	<i>Resultados Utilizando o Controle PID.....</i>	<i>52</i>
	CONCLUSÃO.....	58
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
	APÊNDICE A	62
A.1.	<i>Determinação da velocidade medida no pitot.....</i>	<i>62</i>
A.2.	<i>Sensor de Pressão.....</i>	<i>62</i>
A.3.	<i>Ganho do condicionador de sinal.....</i>	<i>63</i>
A.4.	<i>Cálculo da velocidade média.....</i>	<i>64</i>
A.5.	<i>Programação final utilizada no esp32.....</i>	<i>64</i>
A.6.	<i>Programação final LabView.....</i>	<i>66</i>

<i>A.7. Circuito de condicionamento do sinal do sensor</i>	<i>68</i>
APÊNDICE B.....	69
<i>B.1. Exemplo configuração ADC1_CH0</i>	<i>69</i>
<i>B.2. Configuração de teste para uma saída PWM.....</i>	<i>69</i>
<i>B.3. Código de teste para comunicação serial</i>	<i>69</i>
<i>B.4. LabView para teste comunicação serial</i>	<i>70</i>
<i>B.5. Link para acessar pasta de arquivos.....</i>	<i>70</i>

1 INTRODUÇÃO

A ideia de automação vem desde o século XIX com os primeiros teares automáticos. O conceito foi instituído nos Estados Unidos apenas em 1946, nas fábricas automotivas, resultado direto de um mercado cada vez mais competitivo e exigente em termos de qualidade e velocidade de produção. Além de aumentar a capacidade produtiva, a automação reduzia os custos operacionais, garantia a segurança, qualidade e padronização do produto (GUTIERREZ, 2008; ROSÁRIO, 2012; GOEKING, 2010).

A introdução da eletrônica analógica durante as décadas de 1950 e 1960 possibilitou a ampliação das distâncias entre o elemento de campo e a sala de controle, simplificando a transmissão de informações e contribuindo para a disseminação dos sistemas de controle automático (GOEKING, 2010).

Atualmente, a indústria passa por um período de mudança no qual as tecnologias estão mais evidentes e integradas, considerado por muitos como a Quarta Revolução Industrial, a chamada Indústria 4.0 (DALENOGARE, 2019). Um profissional recém-formado na área de Engenharia de Controle e Automação certamente encontrará diversos desafios no mercado de trabalho. Assim, o entendimento prático do controle de processos industriais é de fundamental importância na formação profissional, sem deixar de lado os conteúdos teóricos que são indispensáveis na realização dos experimentos.

A utilização de protótipos para o estudo de controle de processos industriais é uma forma importante na capacitação dos alunos de Engenharia, e por isso, as instituições de ensino investem substancialmente nisso. Os protótipos permitem aos professores simulações de casos reais da indústria, garantindo aos alunos atividades que factualmente serão importantes na construção de suas competências profissionais (OLIVEIRA, 2017).

Muitos processos industriais necessitam do transporte enclausurado de uma corrente de ar, como por exemplo, um sistema de secagem ou de transporte pneumático. A velocidade do ar na linha é uma das variáveis a ser controlada, e nestes casos, afeta diretamente o desempenho do sistema. Para os exemplos citados, sabe-se que o aumento da velocidade do ar em um secador contribui para o aumento da taxa de secagem do material, por outro lado, deve-se controlar a velocidade para que a resistência instalada no secador possibilite ao ar atingir a temperatura ideal de secagem. No caso dos sistemas de transporte pneumático, dependendo da velocidade do ar na linha, o processo pode ocorrer em fase densa ou diluída, e nestes casos, pode ser que pequenas variações de velocidade inviabilizem o processo.

Portanto, o estudo de sistemas de controle de velocidade se torna muito importante para alguns processos industriais, motivando muitas instituições de ensino a trabalharem com estes sistemas no sentido de proporcionar aos alunos atividades práticas que remetam a casos reais da indústria.

O objetivo deste trabalho foi construir uma bancada experimental, permitindo aos usuários controlar a velocidade do ar em uma linha através de um ventilador centrífugo. Para isto, um supervisor foi desenvolvido no sentido de acompanhar em tempo real o controle do processo. O protótipo foi desenvolvido em uma plataforma que permite a utilização de Microcontroladores, com o intuito de atender a diferentes disciplinas da área de Engenharia Elétrica e de Controle e Automação do Instituto Federal de Goiás, Campus Itumbiara.

2 OBJETIVOS

2.1 *Objetivo Geral*

O principal objetivo deste projeto é desenvolver e implementar uma bancada de estudo para o controle de velocidade do ar em dutos. O sistema foi desenvolvido em uma plataforma que permita a utilização de microcontroladores.

2.2 *Objetivos Específicos*

- Projetar uma linha para transporte de ar a partir de um ventilador centrífugo.
- Estudar o controle do ventilador centrífugo para o transporte de ar.
- Desenvolver um supervisor para aquisição de dados e controle da velocidade do ar transportado.
- Implementar o controle de velocidade, considerando o instrumento para medida da variável o pitot.
- Avaliar os perfis de velocidade ao longo da seção transversal da tubulação para diferentes rotações do ventilador centrífugo, com o intuito de determinar a velocidade média e a vazão de transporte para o escoamento em regime turbulento.
- Melhorar a infraestrutura do laboratório de processos industriais, contribuindo para as aulas práticas dos cursos Engenharia Elétrica e de Controle e Automação do Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diversos processos industriais utilizam o controle de velocidade e vazão de fluidos para manter um fluxo contínuo entre entrada e saída de materiais. Entre os objetivos para efetuar esse controle, estão:

- Efetuar o monitoramento constante;
- Monitorar a vazão de um fluido;
- Determinar a proporção de materiais introduzidos em um processo;
- Controlar o rendimento do processo.

Os processos de secagem de grãos, por meio de ventilação forçada, necessitam de um fluxo de ar constante, para que ocorra de forma uniforme e no tempo estimado correto. O tempo gasto para concluir esse processo depende de vários fatores, como umidade inicial do grão a ser seco, temperatura, umidade relativa do ambiente, fluxo do produto pelo secador e do fluxo de ar utilizado. Portanto, a variação do fluxo de ar afeta diretamente no tempo de secagem, sendo que em determinadas situações, é mais eficiente aumentar a vazão de ar do que o aumentar a temperatura, pois essa pode prejudicar a qualidade do produto (SILVA, AFONSO, DONZELLES).

Outra aplicação é em transportadores pneumáticos, que oferecem uma boa eficiência para uma grande variedade de produtos, além de apresentar diversas vantagens em comparação aos transportadores mecânicos, como velocidade, custo de manutenção, proteção do produto transportado, transporte vertical e/ou horizontal, sendo utilizado na alimentação de diversos processos industriais. O transporte em fase densa ou diluída depende do tipo de material a ser transportado, sendo que para uma grande maioria, o transporte em fase densa, com velocidades entre 1,5 e 10 m/s é o mais ideal, pois diminui a abrasão da linha e a degradação do produto transportado (SACRAMENTO, 2012).

Alguns produtos transportados por esse tipo de sistema são: alumina, óxido de alumínio, argila, barita, bauxita, bentonita, bórax, carbonato de cálcio, cloreto de cálcio, negro de fumo, cimento, café (cru, torrado, moído), detergente, feldspato, carvão, farinha, cinza, fluorita, areia, mistura para vidro, caco de vidro, gesso, óxido de ferro, caulim, cianita, calcário, magnésio, leite em pó, amendoim, resina de PVC, sal, sílica, barrilha, sulfato de sódio, enxofre, açúcar, dióxido de titânio, entre outras (SACRAMENTO, 2012).

Todos esses processos necessitam do controle de velocidade e vazão de ar, para tanto, existem diversos medidores de velocidade e vazão de fluidos, sendo que cada tipo é utilizado em diferentes aplicações e possuem características próprias. A escolha de cada instrumento

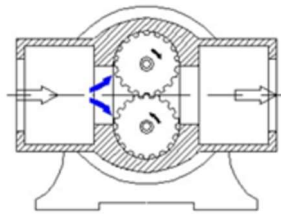
depende do sistema ao qual será utilizado. Ambientes de alta pressão, temperatura elevada, fluidos abrasivos ou viscosos, faixa de pressão para medição (fundo de escala), precisão, além de diversos aspectos, irão definir qual instrumento de medição deve ser utilizado para garantir a confiabilidade necessária ao sistema.

3.1 Medidores de deslocamento positivo

Esse tipo de instrumento de medição é destinado para fluidos viscosos como óleos, mel, chocolate, resinas, vernizes e outros. Seu funcionamento se baseia no deslocamento de engrenagens ou eixos que são rotacionados pelo fluido, consequentemente, são instrumentos que geram uma grande perda de carga. A cada término de um ciclo, se tem um volume conhecido de fluido deslocado pelo medidor. Esse movimento pode ser transmitido para um indicador, por meio de engrenagens ou para dispositivos eletrônicos, que convertem esse movimento em sinais elétricos (PAULA, 2015). Dentre os principais medidores de deslocamento positivo, destacam-se:

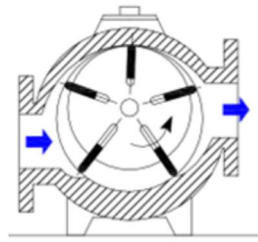
- Medidor de engrenagens (Figura 1): possui uma construção semelhante a uma bomba de engrenagens, mas com seu princípio de funcionamento inverso. Nele, o fluido é quem desloca as engrenagens e, esse movimento é detectado por um sensor que gera pulsos elétricos que informam a quantidade de fluido deslocado no medidor.
- Medidor de palhetas (Figura 2): a pressão do fluido faz com que as palhetas se movimentem e girem o eixo do medidor. As palhetas aprisionam o fluido entre o rotor e o corpo do medidor em um volume conhecido, onde a cada rotação, um volume exato de fluido é transportado pelo medidor. Essa rotação é transmitida por um conjunto de engrenagens até um indicador ou transmissor.
- Pistão rotativo (Figura 3): é composto por um pistão rotativo com eixo excêntrico que é rotacionado com a passagem do fluido em suas câmaras. Esse movimento é transmitido para um indicador ou transmissor. A cada rotação, se tem um volume constante de fluido deslocado pelo medidor que é igual a soma do volume de suas câmaras;

Figura 1 - Medidor de engrenagens



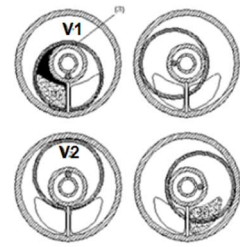
Fonte: UFPR (2015)

Figura 2 - Medidor de paletas



Fonte: UFPR (2015)

Figura 3 - Pistão rotativo



Fonte: Adaptado de UFPR (2015)

3.2 Medidores de velocidade

São instrumentos utilizados para realizar a medição da velocidade de um fluido, geralmente água ou gases. Alguns desses instrumentos são os anemômetros, que possibilitam a medição pontual de velocidade de um fluido em escoamento, seja interno à uma tubulação ou ao ar livre, sem restrições físicas (FREDERICO, 2006).

O anemômetro de concha (Figura 4) é o mais simples, possuindo conchas ocas esféricas, dispostas simetricamente em um eixo vertical. Cada haste forma um ângulo reto com o eixo e possui uma concha na ponta. A rotação do eixo independe da direção, além de ser diretamente proporcional a velocidade do escoamento do fluido, gerando um nível de tensão proporcional a esse movimento (FREDERICO, 2006).

Os anemômetros de hélice possuem o mesmo princípio do funcionamento dos anemômetros de concha, mas o plano de rotação das suas hélices deve ser posicionado perpendicular a direção do fluido, como representado na Figura 5 (FREDERICO, 2006);

No caso de um anemômetro de fio quente (Figura 6), diferentemente dos dois modelos anteriores, não existe parte móvel. Seu princípio de funcionamento se baseia no resfriamento de uma resistência elétrica pela transferência de calor por convecção, que indica a velocidade do fluido (FREDERICO, 2006).

Figura 4 - Anemômetros de concha



Fonte: SIGMA (2022)

Figura 5 - Anemômetros de hélice



Fonte: MINIPA (2022)

Figura 6 - Anemômetros de fio quente



Fonte: SIGMA (2022)

3.3 Medidores deprimogênicos

Os medidores deprimogênicos são instrumentos muito utilizados para a medição de velocidade e vazão de um fluido em um escoamento interno à uma tubulação. Esses instrumentos possibilitam determinar indiretamente tais grandezas, a partir da diferença de pressão entre dois pontos distintos obtida por um sensor diferencial de pressão (BOJORGE, 2017).

Alguns dos medidores utilizados com frequência serão apresentados na seção 3.3.1, 3.3.2 e 3.3.3. Neste tipo de medição indireta é levado em consideração a equação de conservação da massa, o balanço de energia e a geometria da tubulação por onde o fluido é transportado (HALLIDAY, 2016).

3.3.1 Placa de orifício

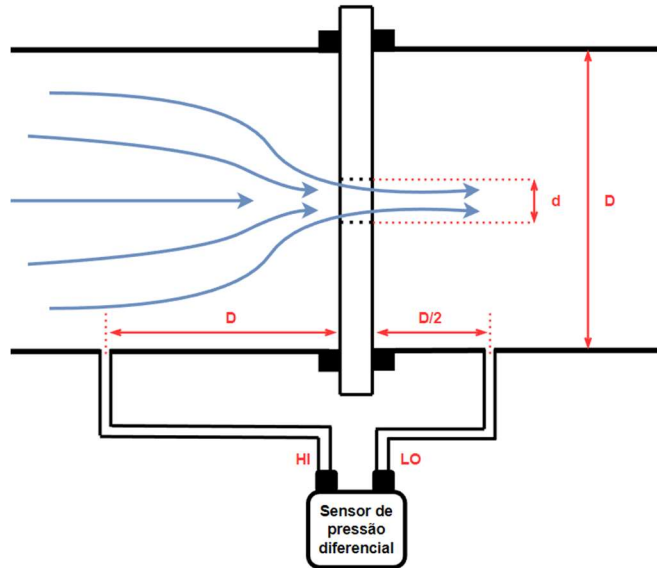
É uma das formas mais simples de se criar diferença de pressão em uma tubulação. A placa de orifício (Figura 8), como o nome já diz, é uma placa de metal, geralmente fabricada de aço inox ou latão, que possui um orifício, possibilitando a passagem do fluido. A restrição abrupta é responsável por gerar a diferença de pressão. Os orifícios podem ser concêntricos, excêntricos ou segmental (Figura 7) e são instalados perpendicularmente ao eixo da tubulação, sendo essencial que as bordas do orifício estejam sempre em perfeito estado, pois podem comprometer a precisão do instrumento (BOJORGE, 2017).

Figura 7 - Orifício concêntrico, excêntrico e segmental



Fonte: BOJORGE (2017)

Figura 8 - Placa de orifício



Fonte: Autor (2022)

A partir da placa de orifício é possível determinar a velocidade de escoamento do fluido (v_D) em um duto utilizando a Equação 1 e, consequentemente, a vazão volumétrica (Q) com a Equação 2, em que C_D representa o coeficiente de descarga e pode ser determinado experimentalmente em função do Número de Reynolds (Re) e da relação dos diâmetros (d/D).

$$v_D = \sqrt{\frac{2(P_{HI} - P_{LO})}{\rho \left[\left(\frac{A_D}{A_d} \right)^2 - 1 \right]}} \quad (1)$$

$$Q = C_D v_D A_D \quad (2)$$

- **Vantagens:**

- ✓ fácil instalação;
- ✓ baixo custo de aquisição.

- **Desvantagens:**

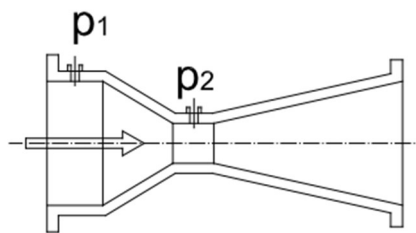
- ✓ alta perda de carga;
- ✓ acúmulo de sólidos;

- ✓ aumento do custo de manutenção devido ao desgaste no orifício.

3.3.2 Venturi

O tubo de Venturi (Figura 9) consiste em um estrangulamento gradual da tubulação até uma seção estreita, por onde passa o fluido, gerando uma diferença de pressão e velocidade entre as seções com diferentes diâmetros. Ele é utilizado com o objetivo de limitar a queda de pressão na linha, já que o fluxo não sofre colisões abruptas, causando uma menor perda de carga se comparado com a placa de orifício (BOJORGE, 2017).

Figura 9 - Tubo Venturi



Fonte: UFPR (2015)

As Equações 1 e 2 também são utilizadas para determinação da velocidade e vazão volumétrica de escoamento do fluido em dutos, sendo o coeficiente de descarga (C_D) determinado experimentalmente dependendo do Reynolds (Re) e da relação dos diâmetros (d/D).

- **Vantagens:**

- ✓ perda de carga reduzida;
- ✓ minimização do acúmulo de sólidos;
- ✓ baixo custo de manutenção.

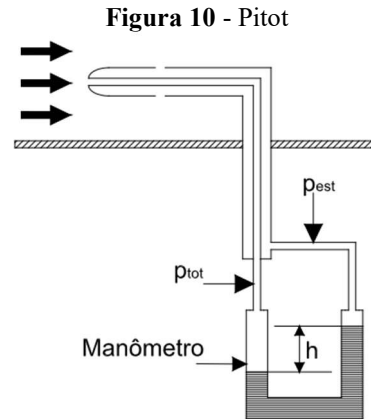
- **Desvantagens:**

- ✓ alto custo de instalação;
- ✓ demasiado espaço para instalação;
- ✓ necessidade de um sensor de pressão de alta sensibilidade.

3.3.3 Pitot

O Pitot (Figura 10) é um tubo com pequeno diâmetro que possui no mínimo duas aberturas, uma em sua extremidade que fica posicionada contra a direção do fluxo (pressão total) e a segunda perpendicular a primeira (pressão estática). A velocidade é então calculada pela diferença de pressão gerada entre os dois pontos do Pitot. É muito utilizado para determinar a

velocidade e vazão em sistemas de ventilação e possibilita a medição pontual ao longo da seção transversal da tubulação devido ao seu tamanho reduzido (BOJORGE, 2017; MASSARO, 2020).



Fonte: UFPR (2015)

Um sensor de pressão diferencial é usado junto ao Pitot para medir a diferença entre a pressão total e estática. Dessa forma, é possível determinar a velocidade pontual do fluido a partir da Equação 3, detalhada no Apêndice A.1.

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (3)$$

Destaca-se que o pitot é utilizado para determinação da velocidade em um ponto, portanto, para determinação precisa da vazão é necessário mapear o perfil de velocidade do escoamento ao longo do raio da tubulação, que permite o cálculo da velocidade média (v_m). Assim, com a velocidade média devidamente calculada, determina-se a vazão de escoamento do fluido através da Equação 4.

$$Q = Av_m \quad (4)$$

- **Vantagens:**

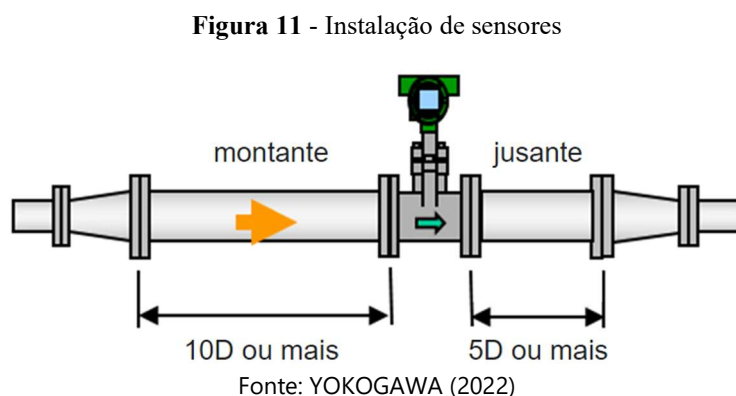
- ✓ fácil instalação;
- ✓ baixo custo;
- ✓ pouca perda de carga;
- ✓ tamanho pequeno e podem ser instalados em tubulações estreitas.

- **Desvantagens:**

- ✓ fácil obstrução das aberturas por partículas;
- ✓ Sensível a distúrbios do escoamento.

3.4 Instalação mecânica de sensores

Turbilhonamentos do fluido podem prejudicar o funcionamento de sensores, eles são normalmente causados por bombas, válvulas, curvas e outros obstáculos na linha. Para obter medições confiáveis, recomenda-se que a linha tenha um trecho reto à montante e à jusante do sensor proporcional ao diâmetro da tubulação, com representado na Figura 11 (ABNT, 2008; YOKOGAWA, 2022).



Retificadores de fluxo de linha são bastante utilizados para minimizar o trecho reto necessário a montante do ponto de instalação do sensor, como pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 - Retificador de fluxo de linha

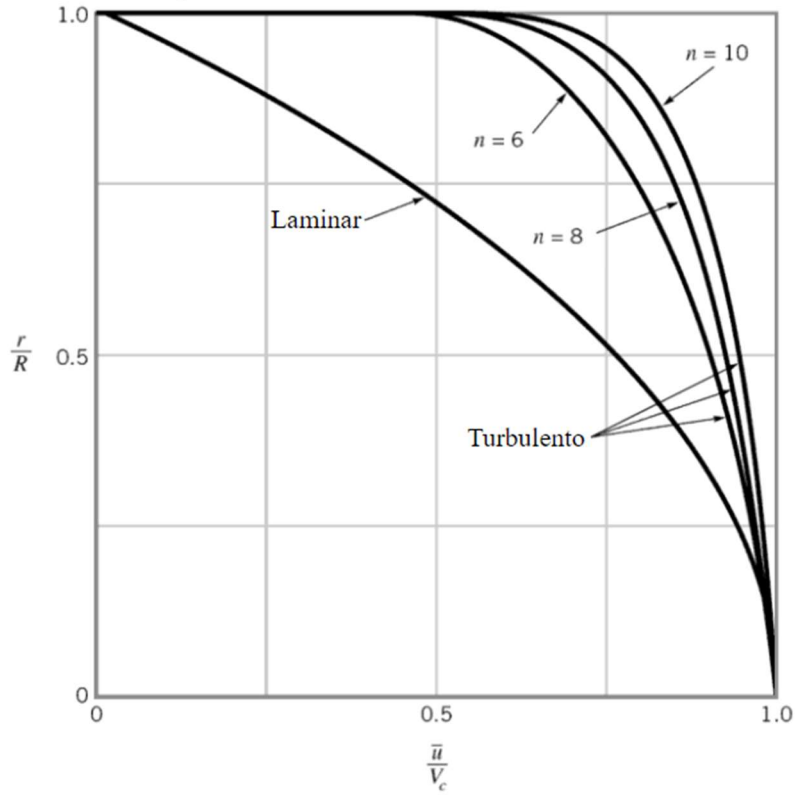


Fonte: FLUXCON (2022)

3.5 Determinação do perfil de velocidade do escoamento

A determinação do perfil de velocidade de escoamento de um fluido (Figura 13) é importante para prever o comportamento de um sistema e realizar medições como vazão volumétrica e vazão mássica a partir de um único ponto aferido.

Figura 13 - Perfil de velocidade de escoamento



Fonte: CONNOR (2019)

A partir das velocidades obtidas ao longo da seção transversal da tubulação, é possível realizar uma regressão não linear para determinar o perfil de velocidade do fluido, utilizando para tubo liso e regime turbulento o modelo aproximado pela “lei de potências” (Equação 5) (ÇENGEL, 2015; CONNOR, 2019).

$$v = v_{max} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

O expoente n é uma constante cujo valor depende do número de Reynolds. O valor de n aumenta com o aumento do número de Reynolds. O valor $n = 7$ geralmente se aproxima de muitos fluxos na prática, dando origem ao termo perfil de velocidade da lei de potência de um sétimo (ÇENGEL, 2015).

A velocidade média é determinada através da integral do perfil de velocidade em função da área (Equação 6).

$$v_m = \iint v dA \quad (6)$$

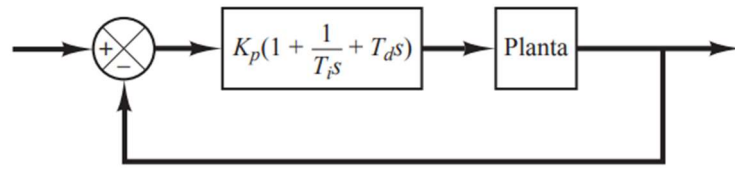
Assim, a velocidade média a partir do perfil de velocidade ajustado pela lei de potências se resume a Equação 7, sendo todo o detalhamento matemático apresentado no Apêndice A.4.

$$v_m = \frac{2v_{max}}{R^2} \int_0^R \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} r dr \quad (7)$$

3.6 Controle PID

Para realizar a sintonia de controles PID (Figura 14), Ziegler e Nichols propuseram dois métodos para a determinação dos valores de K_p (ganho proporcional), T_i (tempo integral) e T_d (tempo derivativo) baseando-se na resposta de regime transitório da planta (OGATA, 2010).

Figura 14 - Controle PID de uma planta



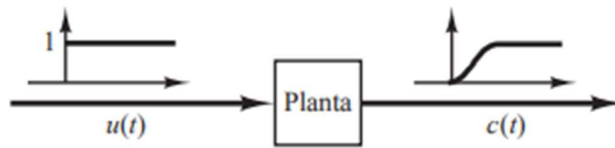
Fonte: OGATA (2010)

Onde o controlador PID é calculado a partir da equação de G(s).

$$G(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (8)$$

O primeiro é o método baseado na resposta ao degrau (OGATA, 2010), onde são determinados duas constantes, o atraso L e a constante de tempo T, a partir da resposta da planta a uma entrada em degrau unitário (Figura 15).

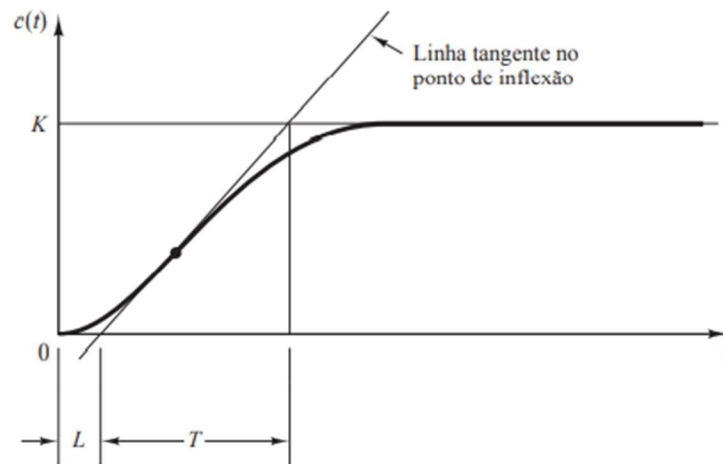
Figura 15 - Resposta ao degrau unitário de uma planta



Fonte: OGATA (2010)

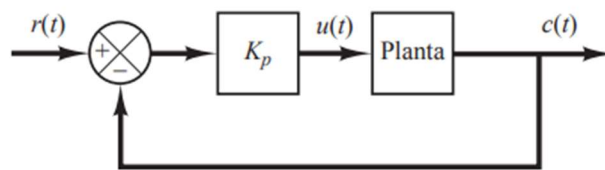
Essas duas constantes são obtidas ajustando-se uma linha tangente no ponto de inflexão da curva com o formato em S e em seguida, determinando a intersecção da linha tangente com o eixo do tempo e a linha constante c(t) = K (Figura 16).

Figura 16 - Curva de resposta em forma de S



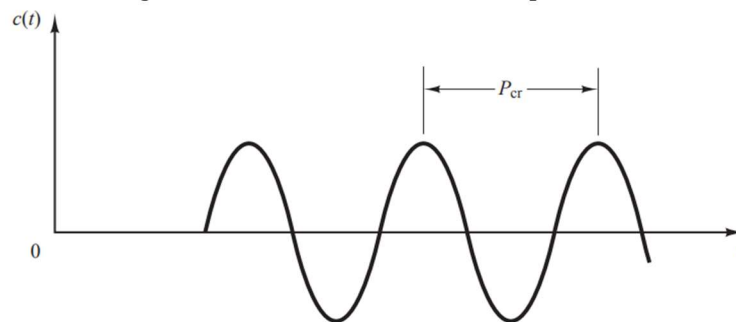
No segundo método, baseado na resposta por frequência (OGATA, 2010), é definido primeiro, $T_i = \infty$ e $T_d = 0$, e é realizado apenas o controle proporcional com K_p variando entre 0 e o ganho crítico K_{cr} (Figura 17).

Figura 17 - Sistema de malha fechada com um controlador proporcional

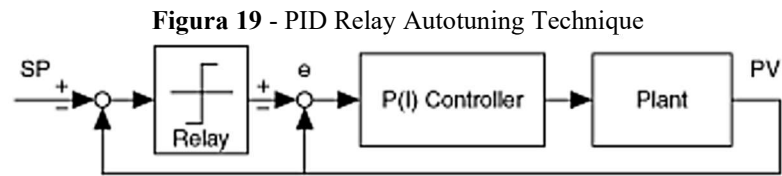


O valor de K_{cr} e o período P_{cr} (medido em segundos) correspondente são determinados experimentalmente, quando a saída exibe uma oscilação sustentada pela primeira vez (Figura 18), ou seja, oscilações constantes ou aproximadamente constantes.

Figura 18 - Oscilação sustentada com período P_{cr}



Para efetuar o controle de velocidade da linha, foi utilizado a ferramenta de controle PID do software LabView, denominada PID Autotuning VI, que implementa o Autotuning Wizard. Essa ferramenta utiliza o método de Ziegler-Nichols junto da técnica de autotuning PID Relay (NI, 2022).



Fonte: NI (2022)

O método de Ziegler-Nichols aplicado pelo LabView, utiliza três tipos de performances de resposta: fast (1/4 damping ratio), normal (some overshoot) e slow (little overshoot) (NI, 2022).

O Relay de setpoint aumenta e diminui o setpoint, estimulando o procedimento de autotuning e permitindo que o controlador responda à mudança e ajuste o sistema para uma resposta aceitável (NI, 2022).

Os ganhos K_c , T_i e T_d são então calculados utilizando os métodos Ziegler-Nichols Closed Loop/Frequency Response (Método de Resposta de Frequência) com os valores de K_u e T_u (Tabela 1), e Ziegler-Nichols Open Loop/Step Response (Método de Resposta ao Degrau) com os valores de T_p e τ (Tabela 2) (NI, 2022).

Esses valores utilizados pelo LabView são respectivamente:

- ✓ K_u e K_{cr} ganho proporcional crítico;
- ✓ T_u e P_{cr} período crítico;
- ✓ T_p e T constante de tempo;
- ✓ τ e L atraso ou tempo morto.

Tabela 1 - Ziegler-Nichols Método de Resposta de Frequência

Performance Rápida			
Controle	Kc	Ti	Td
P	$0.5K_u$	—	—
PI	$0.4K_u$	$0.8T_u$	—
PID	$0.6K_u$	$0.5T_u$	$0.12T_u$
Performance Normal			
Controle	Kc	Ti	Td
P	$0.2K_u$	—	—
PI	$0.18K_u$	$0.8T_u$	—
PID	$0.25K_u$	$0.5T_u$	$0.12T_u$
Performance Lenta			
Controle	Kc	Ti	Td
P	$0.13K_u$	—	—
PI	$0.13K_u$	$0.8T_u$	—
PID	$0.15K_u$	$0.5T_u$	$0.12T_u$

Fonte: NI (2022)

Tabela 2 - Ziegler-Nichols Método de Resposta ao Degrau

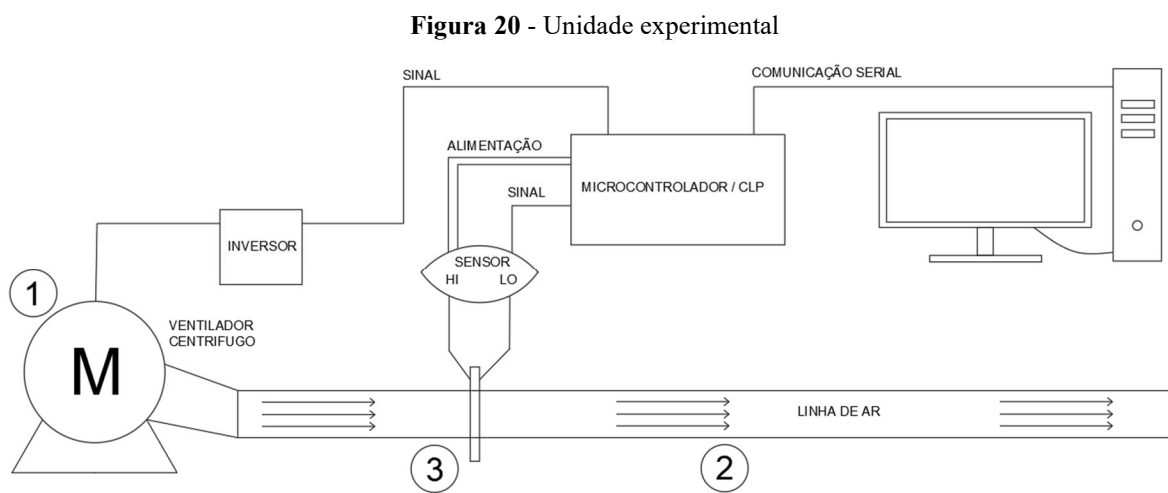
Performance Rápida			
Controle	Kc	Ti	Td
P	T_p/τ	—	—
PI	$0.9T_p/\tau$	3.33τ	—
PID	$1.1T_p/\tau$	2.0τ	0.5τ
Performance Normal			
Controle	Kc	Ti	Td
P	$0.44T_p/\tau$	—	—
PI	$0.4T_p/\tau$	5.33τ	—
PID	$0.53T_p/\tau$	4.0τ	0.8τ
Performance Lenta			
Controle	Kc	Ti	Td
P	$0.26T_p/\tau$	—	—
PI	$0.24T_p/\tau$	5.33τ	—
PID	$0.32T_p/\tau$	4.0τ	0.8τ

Fonte: NI (2022)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Unidade Experimental

A unidade experimental (Figura 20) proposta neste trabalho é composta de um ventilador centrífugo (1), 3 m de tubulação de PVC (2) com 74 mm de diâmetro interno e um suporte para instalação de um pitot (3), responsável por medir a velocidade do ar em uma determinada posição ao longo da seção transversal da tubulação.



Fonte: Autor (2022)

4.2 Ventilador Centrífugo

O ventilador centrífugo utilizado (Figura 21) dispõe de um motor de indução trifásico com rotação nominal de 3480 rpm, que transmite torque ao rotor e promove a movimentação do ar na linha de transporte. O ar entra no ventilador na direção axial ao eixo de rotação e, então, é movido do centro para a periferia do rotor por ação da força centrífuga, saindo perpendicular ao mesmo eixo.

Figura 21 - Ventilador Centrífugo



Fonte: Autor (2022)

4.3 Pitot

Com o pitot (Figura 22) devidamente instalado na linha, a velocidade pode ser calculada através da Equação 3, que é deduzida a partir da aplicação da equação de Bernoulli, detalhado no Apêndice A.1.

Figura 22 - Pitot utilizado



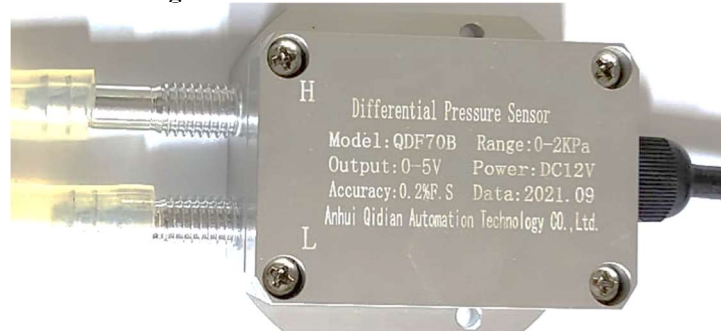
Fonte: Autor (2022)

4.4 Sensor de pressão diferencial

O sensor utilizado neste trabalho foi o QDF70B (Figura 23), que possui um range de 0 ~ 2kPa e resposta em tensão de 0 ~ 5V e uma função de transferência linear apresentada na Equação 9.

$$\Delta P = 400 * V \quad (9)$$

Figura 23 - Sensor de Pressão Diferencial



Fonte: Autor (2022)

4.5 Microcontrolador

Neste trabalho o microcontrolador utilizado foi o ESP32 (Figura 24), como abordado anteriormente. Segundo a fabricante Espressif (ESPRESSIF, 2022), o EP32 é um microcontrolador programável de baixo consumo que permite uma ampla aplicação em diversas áreas, e que apresenta robustez e confiabilidade.

Figura 24 - ESP32



Fonte: Autor (2022)

Esse chip é utilizado por vários fabricantes de plataformas de desenvolvimento em seus produtos. A versão utilizada possui 38 pinos, dos quais 34 são GPIOs que podem ser configurados conforme a necessidade do usuário.

Algumas características importantes observadas para a aplicação nesse trabalho são:

- ✓ Tensão de alimentação de 5V;
- ✓ Tensão máxima de entrada do ADC de 3.3V;
- ✓ Corrente máxima de entrada do ADC de 12mA
- ✓ ADC (Analog to Digital Converter) de 12 bits de resolução;
- ✓ PWM de até 16 bits (configurável).

4.5.1 ADC do ESP32

O Esp32 possui 2 conversores analógico para digital (ADC), com 8 canais no ADC1 e 10 canais no ADC2, ambos com 12 bits de resolução, resultando em 4096 valores distintos com uma faixa de entrada ajustável para 5 níveis de tensão. A tabela a seguir apresenta detalhadamente os ADCs disponíveis no microcontrolador.

Tabela 3 - ADCs do ESP32

ADC1	ADC2
ADC1_CH0 - GPIO36	ADC2_CH0 - GPIO4
ADC1_CH1 - GPIO37	ADC2_CH1 - GPIO0
ADC1_CH2 - GPIO38	ADC2_CH2 - GPIO2
ADC1_CH3 - GPIO39	ADC2_CH3 - GPIO15
ADC1_CH4 - GPIO32	ADC2_CH4 - GPIO13
ADC1_CH5 - GPIO33	ADC2_CH5 - GPIO12
ADC1_CH6 - GPIO34	ADC2_CH6 - GPIO14
ADC1_CH7 - GPIO35	ADC2_CH7 - GPIO27
	ADC2_CH8 - GPIO25
	ADC2_CH9 - GPIO2

Fonte: Autor (2022)

Para exemplificação da configuração da faixa de tensão, é apresentado no Apêndice B.1 o código que permite a leitura do valor no ADC1_CH0 (ESPRESSIF, 2022). A configuração é possível somente para os seguintes valores, sendo utilizado neste trabalho, o valor de atenuação máximo, que possibilita uma faixa de medição sugerida entre 150mV até 3000mV.

```

ADC_ATTEN_DB_0
ADC_ATTEN_DB_2_5
ADC_ATTEN_DB_6
ADC_ATTEN_DB_11
ADC_ATTEN_MAX

```

Essas atenuações permitem regular o nível de tensão máximo suportado pelo ADC, mas acrescentando um erro maior em leituras de valores de tensão mais baixos. Os valores de atenuação e suas respectivas faixas de tensão são apresentados na Figura 25.

Figura 25 - Faixa de tensão sugerida

SoC	attenuation (dB)	suggested range (mV)
ESP32	0	100 ~ 950
	2.5	100 ~ 1250
	6	150 ~ 1750
	11	150 ~ 2450
ESP32-S2	0	0 ~ 750
	2.5	0 ~ 1050
	6	0 ~ 1300
	11	0 ~ 2500

Fonte: ESPRESSIF (2022)

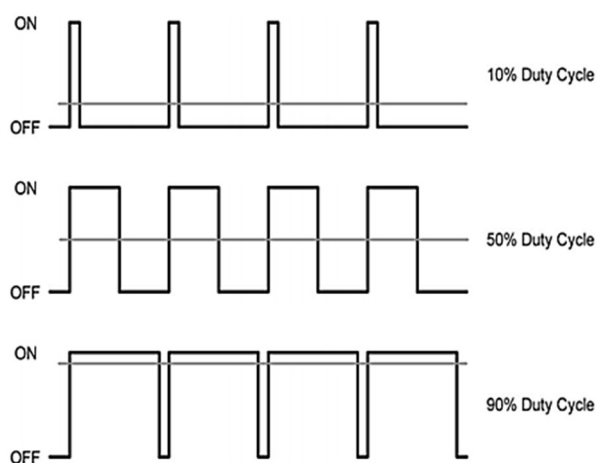
Outra observação a respeito da utilização dos ADCs, é que não é possível utilizar o ADC2 enquanto estiver utilizando o WIFI, pois possuem módulo compartilhado, e as leituras realizadas no ADC1, podem apresentar maior ruído durante o uso do WIFI.

4.5.2 PWM e DAC do ESP32

Um DAC, (Digital Analogic Converter ou Conversor Analógica para Digital), tem a função de transformar valores digitais em sinais analógicos para que seja utilizado em algum processo. O microcontrolador ESP32 disponibiliza duas formas de gerar sinais analógicos. Ele dispõe de dois conversores digitais para analógico de 8 bits de resolução (0 – 255) nas GPIOs 25 e 26, que podem funcionar de forma independente um do outro, com valor de referência igual ao de alimentação.

A segunda forma é pelo PWM que pode ser utilizado através do comando LED PWM. Ele oferece 16 canais independentes (0 – 15) com uma resolução configurável de até 16 bits (ESPRESSIF, 2022). Esse sinal PWM pode ser aplicado a um conversor PWM/Analógico, que terá a função de converter uma onda quadrada para uma tensão proporcional ao *duty cycle* do PWM, que é um valor correspondente ao tempo de alta de cada período do sinal, exemplificado na Figura 26.

Figura 26 - Duty cycle PWM



Fonte: Autor (2022)

Tomando como exemplo esses valores de duty cycle e uma tensão de referência em 5V ($V_{ref} = 5V$), a tensão média (V_{med}) seria de:

- ✓ Duty cycle de 10% = $V_{med} = 0,1 \times 5 = 0,5V$
- ✓ Duty cycle de 50% = $V_{med} = 0,5 \times 5 = 2,5V$
- ✓ Duty cycle de 90% = $V_{med} = 0,9 \times 5 = 4,5V$

Um exemplo de configuração para uma saída PWM utilizando o canal 0 (LedChannel), vinculado ao GPIO 0 (ledPin), com uma resolução de 8 bits e frequência de 1kHz, pode ser visualizado no Apêndice B.1.

4.6 Sistema de Aquisição de Dados e Controle

O controle de velocidade foi implementado utilizando o microcontrolador ESP32, assim, foi preciso desenvolver uma forma de realizar a comunicação entre todos os componentes, desde a aquisição de dados de pressão até o controle de velocidade do ventilador centrifugo, realizado pelo inversor de frequência.

4.6.1 Comunicação do sensor com o microcontrolador

A comunicação entre sensor e microcontrolador é feita por um sinal de tensão analógico gerado pelo sensor. Esse valor é lido em uma das portas ADC do esp32 que pode ser configurada utilizando os valores apresentados na seção 4.5.1.

Para a leitura da variável de processo PV, foi utilizado o canal 4 do ADC1 (ADC1_CHANNEL_4), como pode ser observado no código implementado.

```
#include <driver/adc.h>
```

```
...
```

```
adc1_config_width(ADC_WIDTH_BIT_12);
```

```
adc1_config_channel_atten(ADC1_CHANNEL_4, ADC_ATTEN_MAX);
```

```
int val = adc1_get_raw(ADC1_CHANNEL_4);
```

Essa configuração teve as seguintes características:

- Porta de entrada na GPIO32
- Valor variável entre 0 ~ 4095 (2^{12}) devido aos 12 bits de resolução do ADC
- Atenuação máxima, permitindo uma leitura de valores entre 0 ~ 3.3V
- Erro considerável na faixa inicial de 0 ~ 0.2V

4.6.2 Condicionamento do sinal gerado pelo sensor

Como o sensor utilizado possui uma resposta de 0 ~ 5V, não é possível ligar diretamente ao ADC do esp32, em função da limitação da faixa de tensão lida pelo esp32, sendo necessário condicionar esse sinal para um nível de tensão variável entre 0 ~ 3.3V.

A estratégia utilizada foi aplicar um ganho (x) de tensão menor que um para diminuir linearmente esse valor de 0 ~ 5V para 0 ~ 3.3V, junto com AO (Amplificador Operacional) para isolar o sinal.

$$x = \frac{3,3}{5} = 0,66 \quad (10)$$

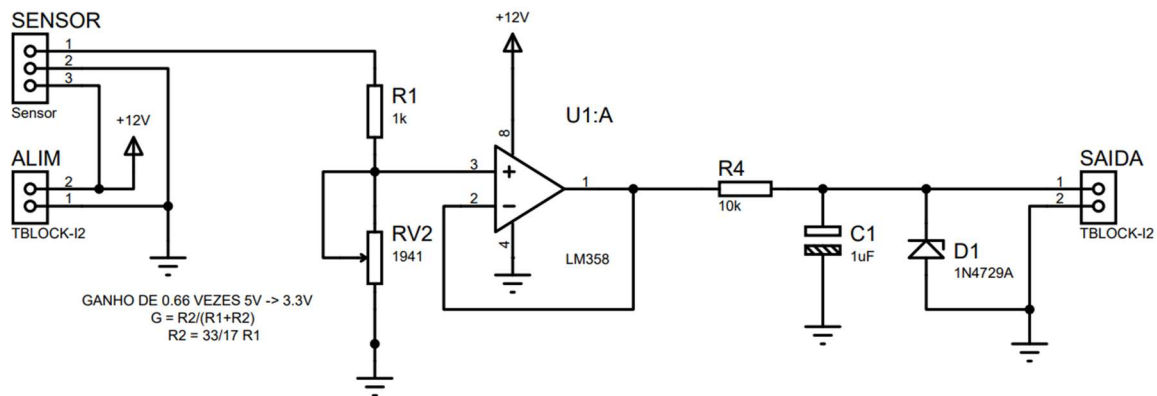
Sendo assim, foi necessário aplicar um ganho de aproximadamente 0.66 vezes. O detalhamento dessa resolução pode ser visto no Apêndice A.3.

$$G = \frac{R2}{R1 + R2} \quad (11)$$

$$RV2 = R2 = \frac{33}{17} R1 \quad (12)$$

Seguindo essas equações, podemos determinar os valores de R1 e RV2 utilizados na montagem do circuito que irá aplicar o ganho desejado (Figura 27).

Figura 27 - Circuito para condicionar o sinal do sensor



Fonte: Autor (2022)

Com a aplicação desse circuito, a função de transferência do sensor para aquisição de dados passa a ser definida pela Equação 13, já que um sinal de 0 V representa 0 Pa e 3,3 V uma pressão de 2000 Pa.

$$\Delta P = 666,66 * V \quad (13)$$

4.6.3 Correção do ADC

Após a configuração da porta ADC para uma atenuação máxima e ajuste desse sinal de tensão a partir do circuito descrito na seção anterior, foi feita a comparação dos valores lidos pelo ADC do ESP32 (V_{adc}), com valores de referência medidos a partir de um multímetro (V_{ref}) e convertidos para uma escala ideal de 0 ~ 4095, utilizando a equação a seguir.

$$V_{2^{12}} = \frac{V}{3,3} * 2^{12} \quad (14)$$

A comparação dos valores obtidos nessa etapa pode ser observada na Tabela 4.

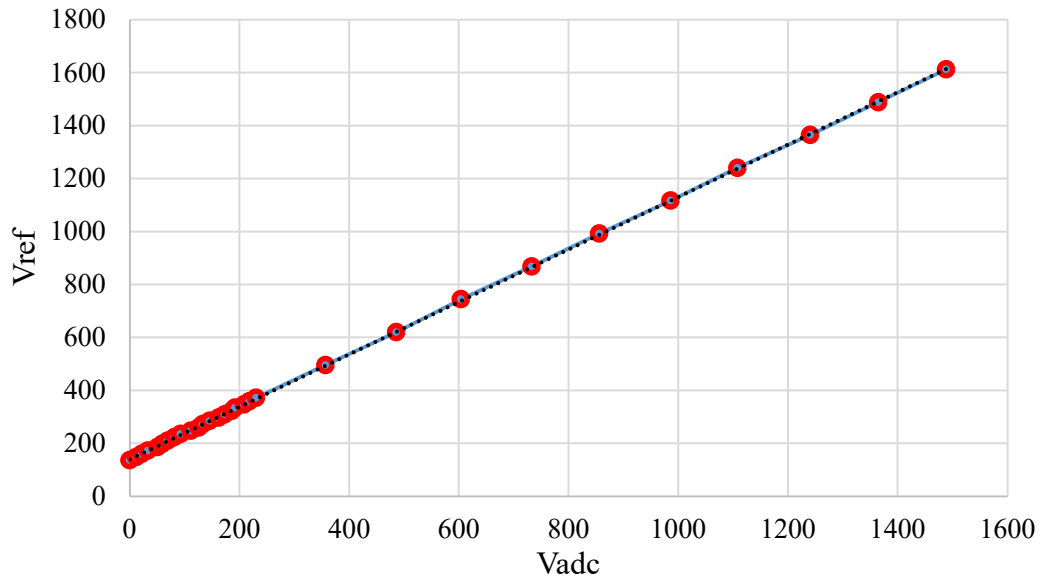
Tabela 4 - Comparativo dos valores do ADC com Vref

Valores em Voltz		Valores de 0 – 4095 (2 ¹²)	
Tensão medida na GPIO Vref	Tensão lida pelo sistema Vadc	Tensão medida na GPIO Vref	Tensão lida pelo sistema Vadc
0,11	0	137	0
0,12	0,01	149	12
0,13	0,018	161	22
0,14	0,027	174	34
0,15	0,041	186	51
0,16	0,048	199	60
0,17	0,056	211	69
0,18	0,066	223	82
0,19	0,075	236	93
0,2	0,09	248	112
0,21	0,102	261	127
0,22	0,108	273	134
0,23	0,118	285	146
0,24	0,131	298	163
0,25	0,14	310	174
0,26	0,15	323	186
0,27	0,155	335	192
0,28	0,168	347	208
0,29	0,176	360	218
0,3	0,186	372	231
0,4	0,288	496	357
0,5	0,392	620	486
0,6	0,487	745	604
0,7	0,591	869	733
0,8	0,69	993	856
0,9	0,795	1117	987
1	0,893	1241	1108
1,1	1	1365	1241
1,2	1,1	1489	1365
1,3	1,2	1613	1489

Fonte: Autor (2022)

A Figura 28 apresenta a curva de calibração que relaciona o valor corrigido do ADC com o valor real lido pelo esp32 (V_{adc}).

Figura 28 - Curva de calibração



Fonte: Autor (2022)

Utilizando esses dados e aplicando uma regressão linear, obtém-se a Equação 15, que relaciona V_{adc} x V_{ref} linearmente. Essa equação é utilizada no LabView com o objetivo de corrigir o valor de entrada V_{adc} para o valor real (V_{ref}).

$$V_{ref} = 0,9906V_{adc} + 140,06 \quad (15)$$

Podemos observar uma limitação do ADC do esp32 para valores de tensão inferiores a 150mV, que foi indicado anteriormente na seção 4.5.1.

4.6.4 Média das amostras

Para melhorar a leitura dos dados de pressão, foi a aplicação de um filtro de médias moveis nos valores de entrada do ADC, após passarem pela correção de leitura (Equação 15).

A aplicação de filtros de médias moveis para a redução de ruídos é extremamente comum, pois são bastante intuitivos e podem ser implementados facilmente (JOSÉ, 2009).

O filtro aplicado utiliza os últimos x valores coletados pelo ADC, e assume-se que todos os valores iniciais são iguais a zero. O código da função criada “media_movel” é descrito a seguir:

```

int amostras[x];
int qtd_amostras = x; //igual ao tamanho do vetor de amostras
double media_movel(int y) {
    sum = 0;
    for(int i=0; i<qtd_amostras-1; i++){
        amostras[i] = amostras[i+1];
        sum += amostras[i+1];
    }
    amostras[qtd_amostras-1] = y;
    sum += y;
    return sum/qtd_amostras;
}

```

4.6.5 Comunicação entre microcontrolador e supervisor

A comunicação entre esp32 e LabView é feita em 2 partes. A primeira etapa é na própria programação do esp32, utilizando a biblioteca serial interna, semelhante a utilizada no Arduino. Um exemplo dessa configuração pode ser visto no trecho de código descrito no Apêndice B.3.

A segunda etapa é no supervisor, utilizando a biblioteca de Instrument I/O – Serial que nos permite configurar entrada e saída dos dados enviados pela porta serial a partir de blocos específicos para cada função, como leitura, escrita, inicialização e encerramento da comunicação. Esse esquema de blocos para efetuar a comunicação serial pode ser visto no Apêndice B.4. A conexão dessas 2 interfaces é feita por um cabo Micro USB/USB.

4.6.6 Comunicação entre supervisor e inversor

O microcontrolador utilizado neste projeto (esp32) possui um conversor digital para analógico (DAC) de 8 bits, mas nesse trabalho foi utilizado o PWM do microcontrolador, que possui uma resolução configurável de até 16 bits juntamente com um conversor PWM para analógico, evitando a conexão elétrica direta entre o esp32 e o inversor de frequência.

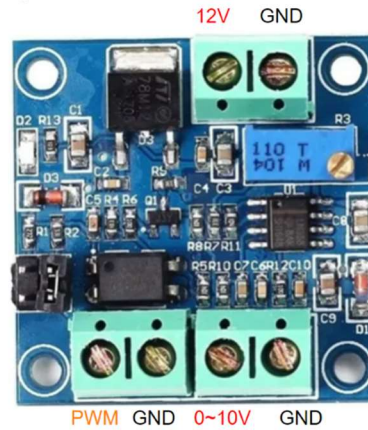
Após o supervisor realizar o tratamento das variáveis de processo e gerar a ação de controle conforme o setpoint de velocidade definido, é retornado uma variável de controle com valores entre 0 e 4095, correspondente aos 12 bits de resolução configurados para o PWM.

Essa variável de controle (c) é convertida proporcionalmente para um sinal PWM conforme a Equação 16.

$$PWM\% = \frac{c}{4095} * 100\% \quad (16)$$

Portanto, a conversão desse sinal pulsado PWM (0 a 100%) em um sinal analógico de 0 ~ 10V, foi realizada por um circuito conversor (Figura 29) que também isola fisicamente o circuito elétrico do microcontrolador do inversor de frequência, por meio de um opto-acoplador.

Figura 29 - Circuito conversor DAC



Fonte: Autor (2022)

Esse circuito é alimentado por uma fonte estabilizada de 12V, independente da alimentação do esp32. Com ele é possível converter o sinal PWM gerado pelo esp32 com $V_{ref} = 3,3V$, em um valor analógico 0 ~ 10V que irá alimentar a entrada analógica AI1 do inversor de frequência (WEG CFW08). A entrada analógica é utilizada para realizar o acionamento remoto do inversor, sendo que essa entrada pode receber uma faixa de tensão padrão de 0 ~ 10 V. Neste caso, não foi necessário parametrizar no inversor um fator de ganho interno, já que o padrão de fábrica apresenta um ganho igual a 1.

Para que o inversor de frequência varie de forma proporcional a frequência de alimentação do motor, conforme o sinal de tensão enviado para ele, foi realizado a configuração dos seguintes parâmetros através da IHM (Interface Homem Máquina) do inversor:

P204 ---- 5
P000 ---- 5
P221 ---- 1
P229 ---- 0
P235 ---- 0

Desta forma, uma resposta linear de frequência (Equação 16) ocorre durante o controle.

$$f = \frac{PWM\%}{100} * 60Hz \quad (17)$$

4.6.7 Resposta do circuito DAC utilizado

Com a finalidade de calibrar e testar o desempenho do conversor analógico digital DAC, foram realizados 2 testes em duas frequências de PWM, 1 kHz e 2 kHz, calibrando o circuito para que na saída, obtivéssemos um valor de 5V para um valor de dutycycle do PWM em 50%, obtendo os seguintes resultados mostrados a seguir nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 - Resposta circuito DAC 1 kHz

rpm	Dutycycle %	Saída (Vout)	Esperado (Vout)
3480	100%	9,2	10
2610	75%	7,2	7,5
1740	50%	5	5
870	25%	2,71	2,5
348	10%	1,29	1

Fonte: Autor (2022)

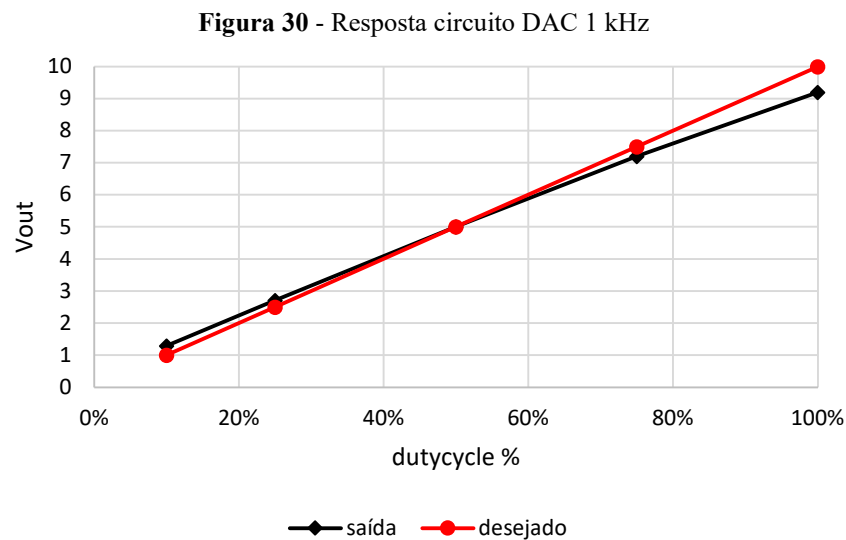
Tabela 6 - Resposta circuito DAC 2 kHz

rpm	Dutycycle %	Saída (Vout)	Esperado (Vout)
3480	100%	8,64	10
2610	75%	7,14	7,5
1740	50%	5	5
870	25%	2,86	2,5
348	10%	1,53	1

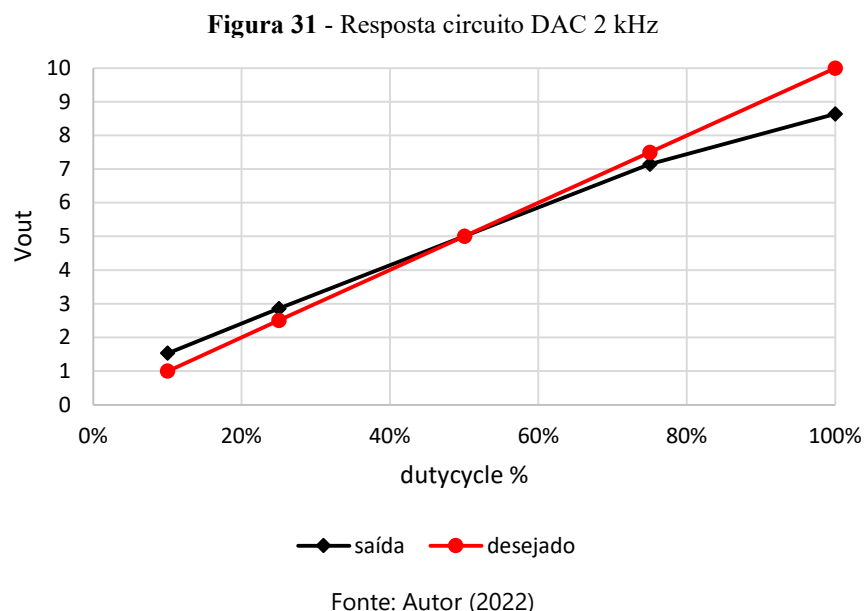
Fonte: Autor (2022)

Exibindo os valores obtidos para 1kHz (Figura 30), podemos ver o resultado do ajuste feito para o ponto central em 50% de dutycycle, onde temos um Vout de 5V, e nas

extremidades da faixa de operação do DAC, temos um erro de +0,29V e -0,8V para os valores de 1V e 10V respectivamente.



Para os valores obtidos do teste em 2kHz (Figura 31), podemos novamente observar o ajuste feito para o ponto central em 50% de dutycycle, onde temos um Vout de 5V, e nas extremidades da faixa de operação do DAC, temos um erro de +0,53V e -1,36V para os valores desejados de 1V e 10V respectivamente.



Observando os resultados dos dois testes, optou-se por utilizar o PWM configurado com frequência de 1kHz, pois houve uma menor distorção do sinal para valores de dutycycle próximos de 100%.

4.7 *Supervisório*

Neste trabalho foi desenvolvido um supervisório responsável por monitorar a velocidade de escoamento do ar no duto de saída do ventilador centrífugo. Neste caso, a velocidade foi determinada através de um pitot, que necessitava da medida de diferença de pressão para, assim, inferir sobre a velocidade em um ponto da tubulação, como apresentado na Equação 3 da seção 3.3.3. Essa diferença de pressão foi determinada pelo sensor apresentado na Figura 23, que enviava um sinal de tensão (V_{out}), e através da Equação 18 (detalhamento no Apêndice A.2), permitia o cálculo via supervisório da velocidade do fluido em um ponto específico, além de tornar possível a implementação do controle em malha fechada.

$$v_1 = \sqrt{\frac{2(666,666V_{out})}{\rho}} \quad (18)$$

A interface de controle foi desenvolvida no software Labview, que possibilita a criação de um supervisório gráfico, que monitora e controlar o processo em tempo real a partir dos dados coletados pelo microcontrolador.

O supervisório é um produto deste trabalho e será detalhado nos resultados apresentados na seção 5.3.

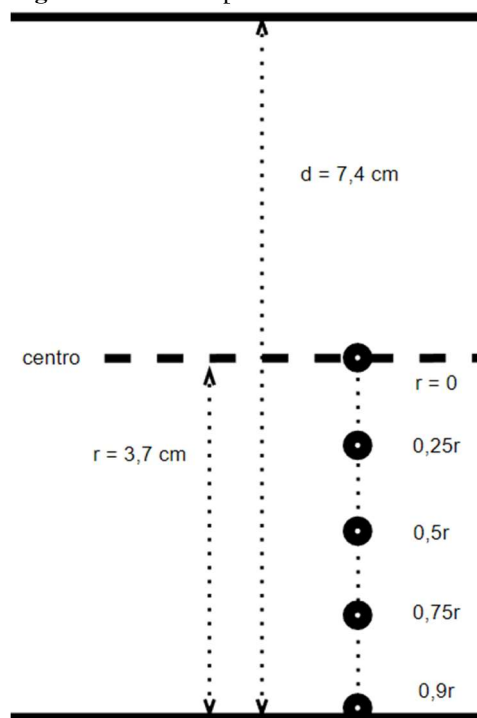
4.8 *Determinação do perfil de velocidade de escoamento*

Com base nas aplicações de secagem e transporte pneumático, que requerem elevadas velocidades de transporte, o regime turbulento foi o único avaliado neste trabalho. Neste caso, o perfil de velocidade para este tipo de regime é bem descrito na literatura, como apresentado na seção 3.5, Equação 5.

Para levantamento dos dados experimentais que permitem a determinação do perfil de velocidade, foram coletadas 5 amostras de velocidade ao longo do raio da tubulação (r), como apresentado na Figura 32. Variou-se a rotação do motor em 6 velocidades diferentes para cada ponto, com o objetivo de verificar o comportamento do perfil de velocidades e avaliar se o resultado influencia na determinação da velocidade média do escoamento do fluido.

As velocidades de rotação do ventilador centrífugo utilizadas foram de 1688 rpm, 1990 rpm, 2300 rpm, 2620 rpm, 2945 rpm e 3480 rpm, sendo os resultados apresentados na seção 5.4.

Figura 32 - Pontos para coleta das amostras



Fonte: Autor (2022)

4.9 Determinação dos parâmetros do controlador PID

Conforme descrito na seção 3.6, os ganhos do controlador PID serão obtidos a partir dos dois métodos apresentados por Ziegler e Nichols e a partir da ferramenta de autotuning PID Autotuning VI.

Os resultados dessa etapa serão descritos na seção 5.5, onde serão calculados os ganhos a partir do método de resposta ao degrau e pelo método de resposta de frequência sustentada, onde os ganhos calculados foram comparados com os ganhos obtidos pela ferramenta de autotuning a partir da resposta do sistema quando aplicado um degrau de comando. Os ganhos do controlador PID com os melhores resultados foram destacados como os melhores ajustes de sintonia para o sistema.

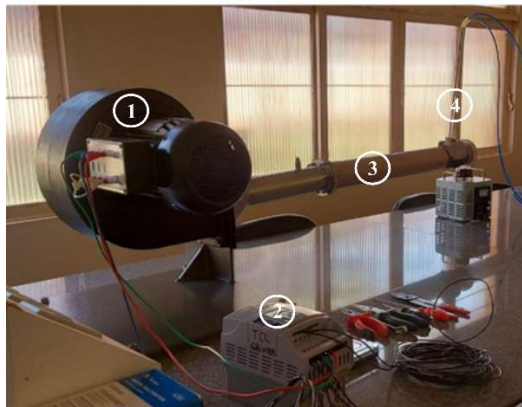
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a unidade de controle desenvolvida, é possível auxiliar com aulas experimentais da área de sistemas de controle e automação, especialmente para o estudo de casos que envolvam controle de processos, no qual, a partir de dados obtidos por um sensor diferencial de pressão, seja possível analisar e controlar um sistema que opere com fluxo de ar.

5.1 Unidade Didática

A unidade confeccionada neste trabalho é apresentada na Figura 33. O ventilador centrífugo (1), responsável pela movimentação do ar na linha de transporte (3), opera em uma determinada rotação, permitindo a velocidade de escoamento do ar ser determinada no centro da tubulação, por um pitot (4), que através de um sensor diferencial de pressão (x), envia o sinal para o microcontrolador/supervisório, responsáveis por tratar o sinal e tomar a ação de controle, que altera a rotação do inversor de frequência (3), controlando a velocidade de rotação do ventilador centrífugo, e conseqüentemente, a velocidade do ar na linha.

Figura 33 - Unidade experimental



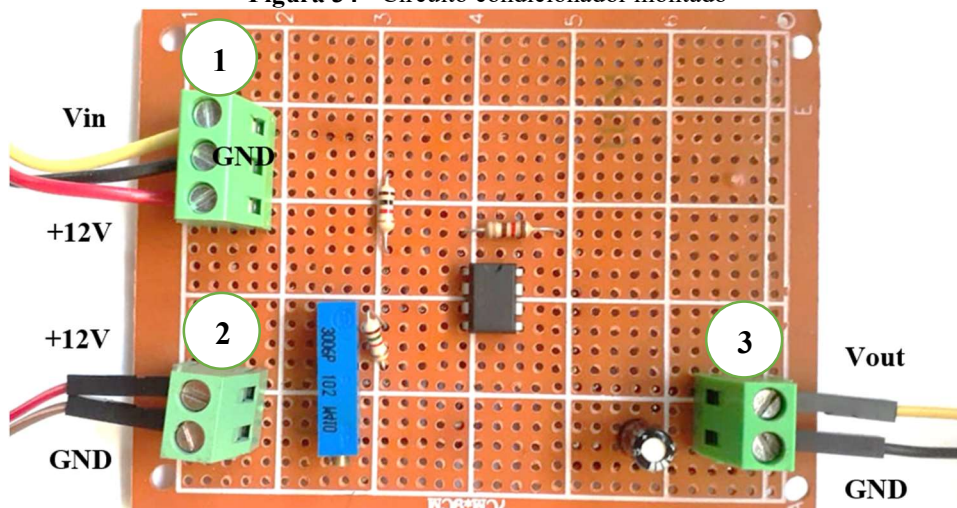
1. Ventilador Centrífugo; 2. Inversor de Frequência (CFW08); 3. Linha de Ar; 4. Pitot
Fonte: Autor (2022)

5.2 Circuito Projetado: Condicionador de Sinal

Conforme especificado na seção 4.6, foi desenvolvido um circuito (Figura 27) para realizar a aquisição e condicionamento da variável de processo, tornando possível a leitura a partir do ADC do esp32.

A partir desse circuito, foi realizado a montagem em uma placa de fenolite perfurado (Figura 34) para a realização dos testes e montagem final.

Figura 34 - Circuito condicionador montado



Fonte: Autor (2022)

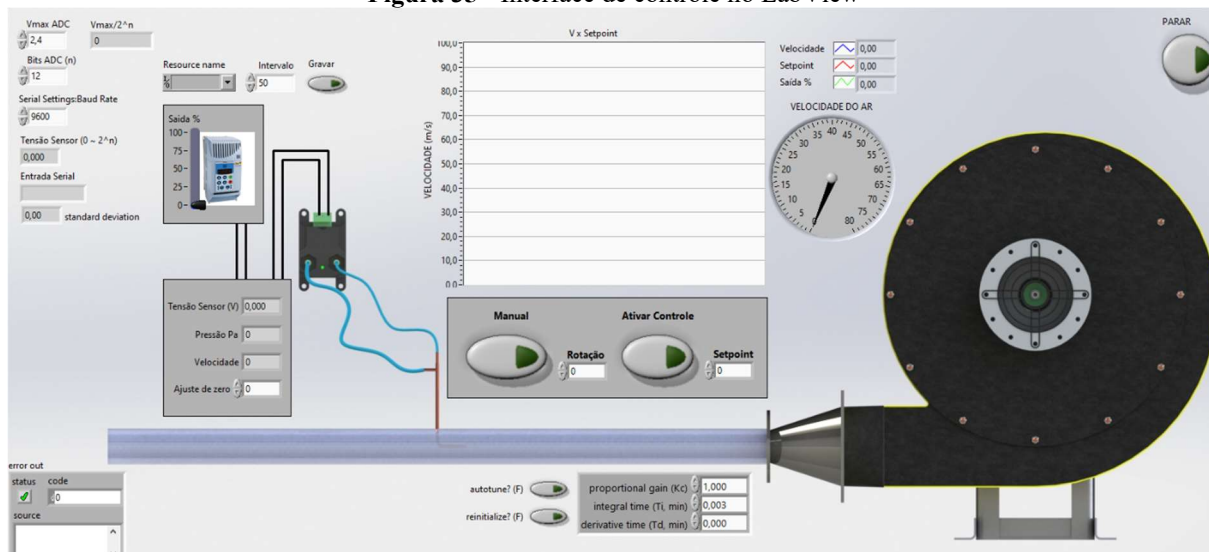
Podemos observar três grupos de conectores, sendo eles:

- ✓ Primeiro: três conectores é onde o sensor é ligado ao circuito sendo Vin o sinal gerado pelo sensor, +12V e GND sua alimentação;
- ✓ Segundo: 2 conectores é a alimentação da placa com +12V e GND da fonte chaveada;
- ✓ Terceiro: 2 conectores é a saída de sinal condicionado da placa para o microcontrolador Vout e GND.

5.3 *Supervisório*

O supervisório desenvolvido (Figura 35) possui uma interface gráfica que exibe a velocidade do ar capturada pelo sistema de aquisição de dados e um detalhamento dessa variável de processo (PV) que obtido a partir do sinal de tensão gerado pelo sensor. Possibilita a visualização de outras variáveis de controle, como a saída de controle (CV) para o inversor de frequência (Saída %), valor de setpoint, ganhos de controle PID, configuração da aquisição de dados e a opção de realizar o armazenamento dos dados coletados em um arquivo de extensão .xlsx (Gravar).

Figura 35 - Interface de controle no LabView



Fonte: Autor (2022)

Nessa interface é possível realizar duas formas de controle:

- ✓ Rotação fixa – controle manual (Manual)
- ✓ Velocidade fixa por *setpoint* – controle PID automático (Ativar Controle)

As duas formas influenciam diretamente na variável de controle que será enviada para o processo.

- ***Rotação fixa***

O usuário define uma velocidade de rotação fixa para o ventilador centrífugo, gerando uma variável de controle (velocidade do ar) constante. O sistema continua a efetuar a aquisição de dados de velocidade com o pitot, mas os valores não são alimentados na malha de controle. Neste caso, o usuário ao informar a rotação do ventilador centrífugo no supervisório, permite que seja enviado um sinal de tensão fixo ao inversor de frequência, que movimenta seu rotor até atingir a rotação informada.

- ***Velocidade fixa por setpoint***

O usuário define um setpoint (SP) e ativa o controle automático, deixando o controle responsável pela coleta e tratamento dos dados de velocidade do ar na linha, que estão sendo adquiridos pelo pitot. Assim, gera-se uma variável de controle para ser aplicada no processo com o objetivo de se atingir o setpoint (SP) definido pelo usuário.

5.3.1 Configuração do supervisorio

O supervisorio possui ao todo 11 entradas de configuração, que podem ser usadas para ajuste, sendo elas:

- $V_{\max}$ ADC – tensão máxima lida pelo conversor analógico para digital
- Bits ADC (n) – resolução do conversor analógico para digital em bits
- Baud Rate – taxa de transferência da comunicação serial
- Resource name – porta usb conectada para comunicação serial
- Intervalo – tempo entre cada aquisição de dados
- Rotação – rotação fixa em rpm para controle manual
- Setpoint – velocidade fixa em m/s para controle automático
- PID – parâmetros de controle utilizados para controle automático
- Ajuste de zero – ajuste fixo para a variável de processo
- Gravar – opção para exportar os dados coletados pelo sistema

A partir dessas configurações é possível ajustar o supervisorio para diferentes sensores com diferentes faixas de tensão e resolução, sendo necessário poucos ajustes nas equações que dependem da função de transferência do sensor utilizado.

Destaca-se que esp32 possui a limitação de tensão máxima de 3,3V e 12 bits de resolução em seu ADC, no entanto, é possível realizar a aquisição de dados aplicando algum tratamento no sinal gerado pelo sensor, como é o caso utilizado nesse trabalho, detalhado na seção 4.6.2. O detalhamento do código desenvolvido para realizar a aquisição de dados e comunicação serial entre esp32 e LabView podem ser vistos nos Apêndices A.5. No Apêndice A.6, podemos visualizar o código desenvolvido utilizando blocos de programação para alimentar toda a parte visual do supervisorio, tratamento dos dados coletados e efetuar o controle PID do sistema.

5.4 Determinação do perfil de velocidade

Utilizando a função de rotação fixa do supervisorio, foram coletadas as amostras nos pontos ao longo da seção transversal da tubulação, como descrito na seção 4.8.

Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 7, em que v representa os cinco pontos de velocidade medida pelo pitot e SD o desvio padrão de cada medida para as seis rotações estudadas neste trabalho.

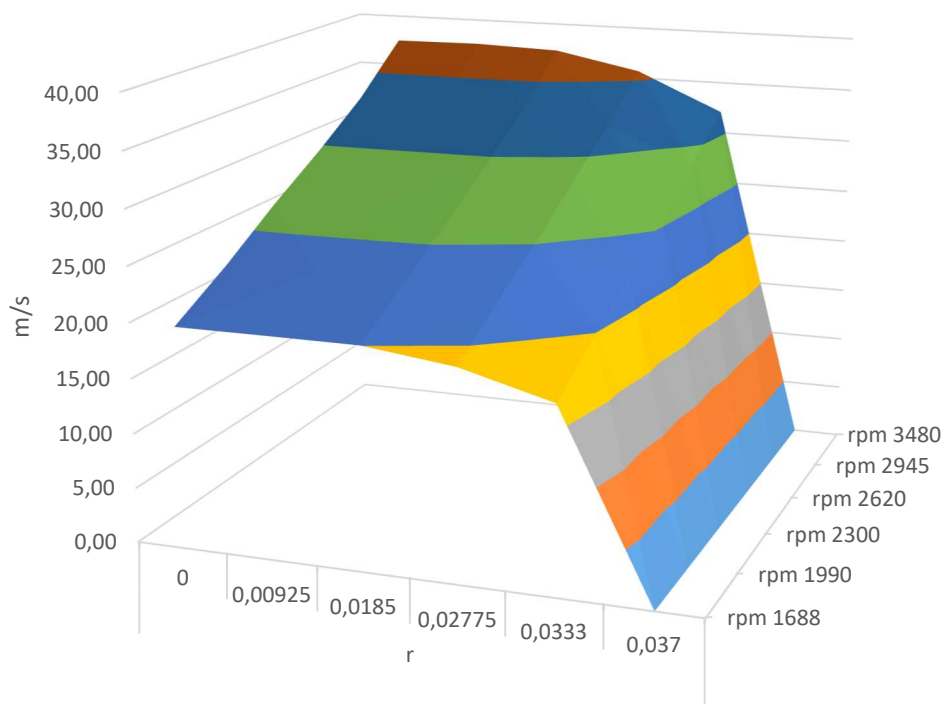
Tabela 7 - Média das amostras e seus desvios padrões

rpm	V ₀ (m/s)	SD ₀	V _{0,25r} (m/s)	SD _{0,25r}	V _{0,5r} (m/s)	SD _{0,5r}	V _{0,75r} (m/s)	SD _{0,75r}	V _{0,9r} (m/s)	SD _{0,9r}
1688	20,02	0,1199	20,03	0,0772	20,02	0,0942	19,02	0,1758	16,81	0,2173
1990	23,08	0,0911	23,18	0,0845	23,17	0,1031	22,26	0,1077	19,95	0,2412
2300	26,54	0,1416	26,47	0,0837	26,32	0,2104	25,31	0,2166	22,75	0,2643
2620	29,66	0,1259	29,64	0,0925	29,60	0,1286	28,62	0,2046	25,76	0,2150
2945	33,09	0,1458	33,13	0,1306	33,07	0,1578	31,83	0,1788	28,85	0,1938
3480	37,48	0,2458	37,58	0,1039	37,32	0,1627	35,69	0,2203	32,07	0,2469

Fonte: Autor (2022)

Utilizando os valores das velocidades (v) ao longo do raio apresentados na Tabela 7 e considerando que a velocidade na parede da tubulação seja 0 m/s, comparou-se, todas as amostras coletadas para diferentes rotações do ventilador centrífugo. A variação da velocidade do ar medida nos mesmos pontos de coleta ao longo do raio, pode ser visto na Figura 36.

Figura 36 - Média das amostras

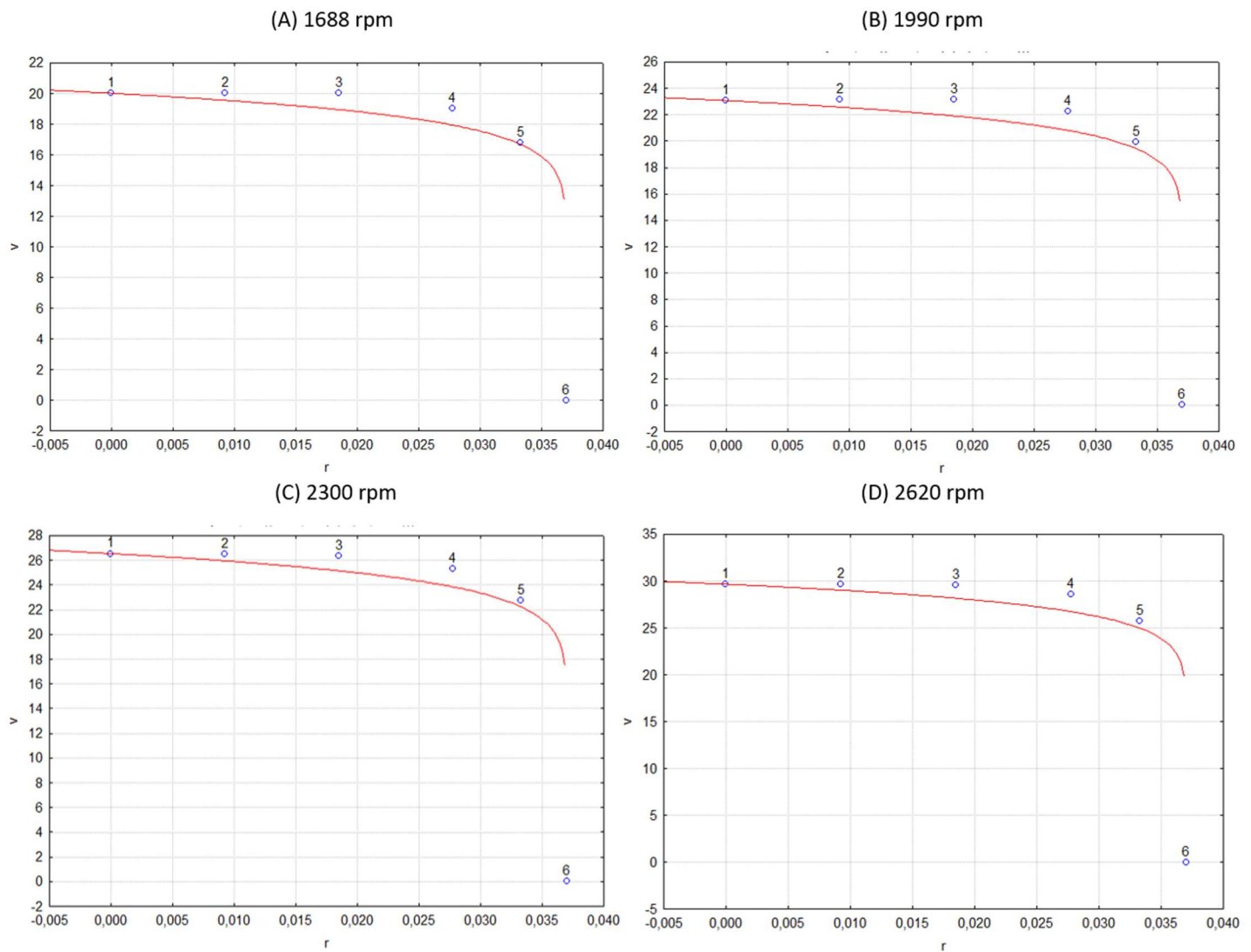


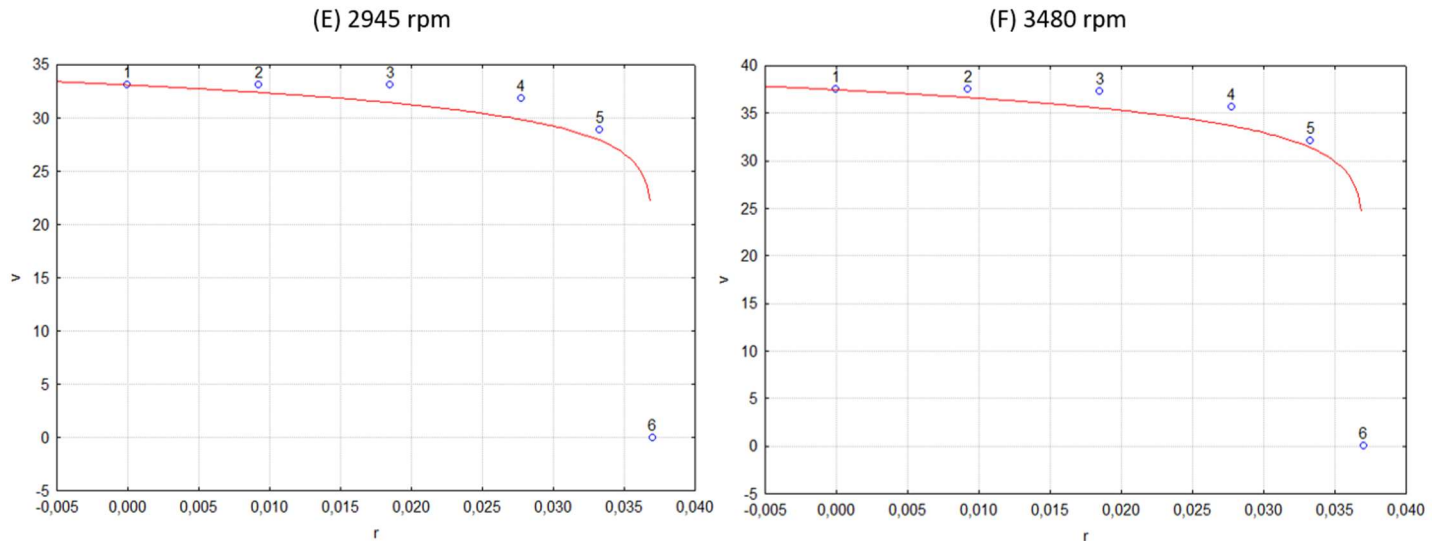
Fonte: Autor (2022)

A partir dela podemos visualizar o comportamento semelhante entre todas as rotações amostradas, mantendo a mesma resposta conforme se distancia do centro, mas com amplitudes diferentes.

Considerando o regime de escoamento turbulento, foi realizada uma regressão não linear para ajuste dos dados do modelo de “lei de potências” (Equação 5), apresentado na seção 3.5. Os dados de velocidade do ar nas diferentes posições medidas ao longo do raio, apresentados na Tabela 7, foram ajustados para as seis rotações (1688, 1990, 2300, 2620, 2945 e 3480 rpm), sendo os resultados apresentados na Figura 37. O software utilizado para a regressão não linear dos dados foi o TIBCO Data Science / Statistica, da empresa StatSoft.

Figura 37 - Ajustes de velocidade obtidos





Fonte: Autor (2022)

Para o ajuste não linear, o parâmetro “n”, da Equação 5, foi o único estimado, haja vista que V_{max} foi determinado experimentalmente pela medida da velocidade do ar no centro da tubulação ($r=0$) em todas as rotações do ventilador centrífugo, como apresentado na Tabela 7. O método numérico utilizado para estimativa do parâmetro “n” foi o de Levenberg-Marquardt, considerando 10^{-2} como critério de convergência.

Na Tabela 8 são apresentados os modelos de “lei de potências” (Equação 5) ajustados em diferentes rotações do ventilador centrífugo. Além disso, a partir do modelo ajustado foi possível determinar a velocidade média a partir da integral da função que descreve esse perfil de velocidade, apresentado na Equação 8.

Tabela 8 - Perfil de velocidade e velocidade média em m/s

rpm	n	SD (m/s)	r^2	$v(r)$	V_{med}
1688	12,645	2,214	0,994	$20,02 \left(1 - \frac{r}{0,037}\right)^{\frac{1}{12,645}}$	$0,892 * V_{max}$
1990	13,385	2,622	0,992	$23,08 \left(1 - \frac{r}{0,037}\right)^{\frac{1}{13,385}}$	$0,897 * V_{max}$
2300	12,991	2,242	0,994	$26,54 \left(1 - \frac{r}{0,037}\right)^{\frac{1}{12,991}}$	$0,894 * V_{max}$
2620	13,421	2,571	0,992	$29,66 \left(1 - \frac{r}{0,037}\right)^{\frac{1}{13,421}}$	$0,897 * V_{max}$
2945	13,461	2,577	0,992	$33,09 \left(1 - \frac{r}{0,037}\right)^{\frac{1}{13,461}}$	$0,898 * V_{max}$

$$3480 \quad 12,987 \quad 2,287 \quad 0,994 \quad 37,48 \left(1 - \frac{r}{0,037}\right)^{\frac{1}{12,987}} \quad 0,894 * V_{max}$$

Fonte: Autor (2022)

De acordo com as velocidades médias (V_{med}) apresentadas na Tabela 8, observa-se um desvio médio dos resultados de 0,2%, o que permite concluir que não existe diferença significativa do perfil de velocidade. Portanto, fica evidente que para o transporte de ar em regime turbulento, nas condições experimentais estudadas, a determinação da velocidade no centro da tubulação é o suficiente para determinar a velocidade média em todas as rotações do ventilador centrífugo. Esta constatação permite demonstrar que a utilização de um pitot também é eficaz para o controle de vazão, pois sem alteração do perfil de velocidade, a velocidade média pode ser determinada por uma mesma equação, com um desvio médio para as rotações estudadas de 0,2%, valor de variação encontrado nos experimentos realizados considerando $Re > 9,6 \times 10^4$.

5.5 *Ganhos de realimentação do controlador PID*

O cálculo dos valores dos ganhos de realimentação utilizados pelo controle PID, foram realizados seguindo a metodologia apresentada na seção 3.6, utilizando o método de Ziegler e Nichols.

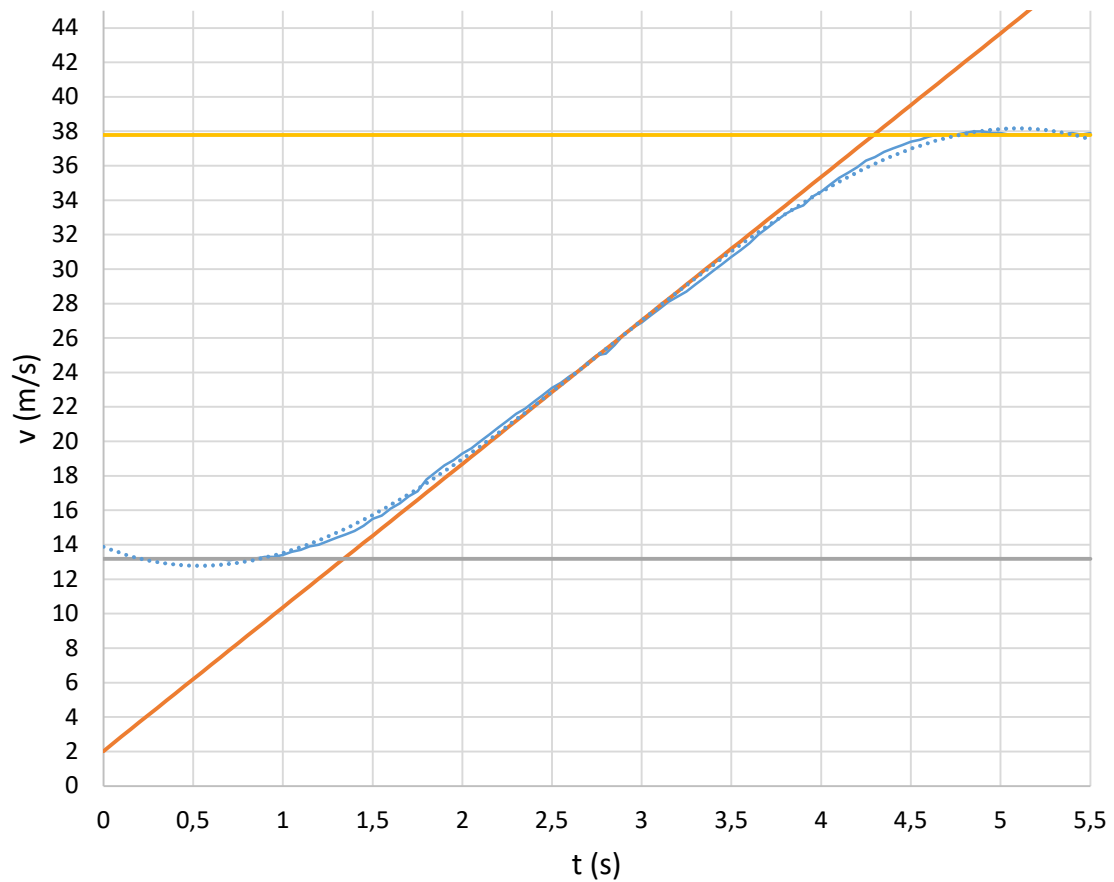
Aplicando-se um degrau de comando ao sistema, que estava estabilizado na velocidade de 13,2 m/s, obteve-se o seguinte comportamento registrado na figura 38, com a resposta definida pela curva $v(t)$ descrita a seguir (Equação 19).

$$v(t) = -0,5332t^3 + 4,4989t^2 - 4,316t + 13,895 \quad (19)$$

A determinação da reta tangente $y(t)$ ao ponto de inflexão da curva $v(t)$, pode ser realizado a partir da primeira e segunda derivada da função $v(t)$, em que a segunda deriva $[v''(t)]$ igualada a zero permite determinar o instante t que ocorre o ponto P de inflexão, e a partir da primeira derivada $v'(t)$, com t sendo o instante de inflexão, encontramos o coeficiente angular da reta tangente ao ponto P (Equação 20).

$$y(t) = 8,33t + 2,0313 \quad (20)$$

Figura 38 - Resposta ao degrau



Fonte: Autor (2022)

Observando os pontos de intersecção com as retas constantes em $v = 13,2m/s$ e $v = 37,8m/s$, determinam-se os valores de tempo morto ($L = \tau = 1,35$ s) e a constante de tempo ($T = T_p = 2,95$ s). Os ganhos K_p , T_i e T_d , apresentados na Tabela 9, podem ser determinados a partir das equações resumidas na Tabela 2.

Tabela 9 - Ganhos PID pelo método de Ziegler-Nichols de Resposta ao Degrau

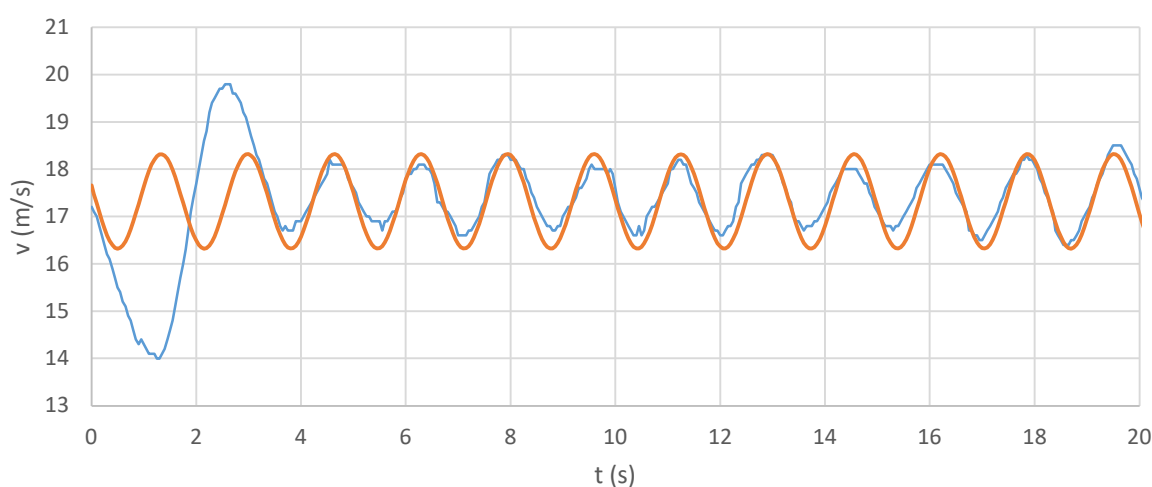
Performance Rápida			
Controle	K_c	T_i	T_d
P	2,18	—	—
PI	2,07	4,4955	—
PID	2,40	2,7	0,675
Performance Normal			
Controle	K_c	T_i	T_d
P	0,9614	—	—
PI	0,874	7,1955	—
PID	1,1581	5,4	1,08

Performance Lenta			
Controle	Kc	Ti	Td
P	0,5681	—	—
PI	0,5244	7,1955	—
PID	0,6992	5,4	1,08

Fonte: Autor (2022)

Aplicando um ganho $K_p = 180$, $T_i = 999999999$ e $T_d = 0$, obteve-se a segunda situação proposta pelo método de Ziegler e Nichols, em que o sistema exibe uma oscilação sustentada (Figura 39).

Figura 39 - Oscilação sustentada para $k=180$



Fonte: Autor (2022)

Ao se ajustar uma senoide (Equação 21) aos dados experimentais, foi possível então calcular o período crítico (P_{cr}) através da Equação 22, para assim, determinar os ganhos K_p , T_i e T_d mostrados na Tabela 10. Cabe destacar que as equações que possibilitam os cálculos dos ganhos (K_p , T_i e T_d) foram apresentados na Tabela 1.

$$f(t) = 17,32 + \text{sen}(3,8 + 2,8) \quad (21)$$

$$Tu = P_{cr} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{3,8} = 1,6534s \quad (22)$$

Tabela 10 - Ganhos PID pelo método Ziegler-Nichols de Resposta de Frequência

Performance Rápida			
Controle	Kc	Ti	Td
P	90	—	—
PI	72	1,3227	—
PID	108	0,8267	0,1984

Performance Normal			
Controle	Kc	Ti	Td
P	36	—	—
PI	32,4	1,3227	—
PID	45	0,8267	0,1984
Performance Lenta			
Controle	Kc	Ti	Td
P	23,4	—	—
PI	23,4	1,3227	—
PID	27	0,8267	0,1984

Fonte: Autor (2022)

5.6 Resultados Utilizando o Controle PID

Baseado nos resultados apresentados nas Tabelas 9 e 10, foram selecionados os ganhos do PID que melhor responderam ao controle de velocidade do processo. Os ganhos PID utilizados para o controle que apresentaram melhor desempenho são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Melhores ajustes de ganhos PID obtidos

	Ajuste 1	Ajuste 2	Ajuste 3	Ajuste 4
Ganho Proporcional Kc	3,48209	23,4	2,4	1
Ganho Integral Ti	0,03329	1,3227	2,7	0,01
Ganho Derivativo Td	0	0	0,675	0

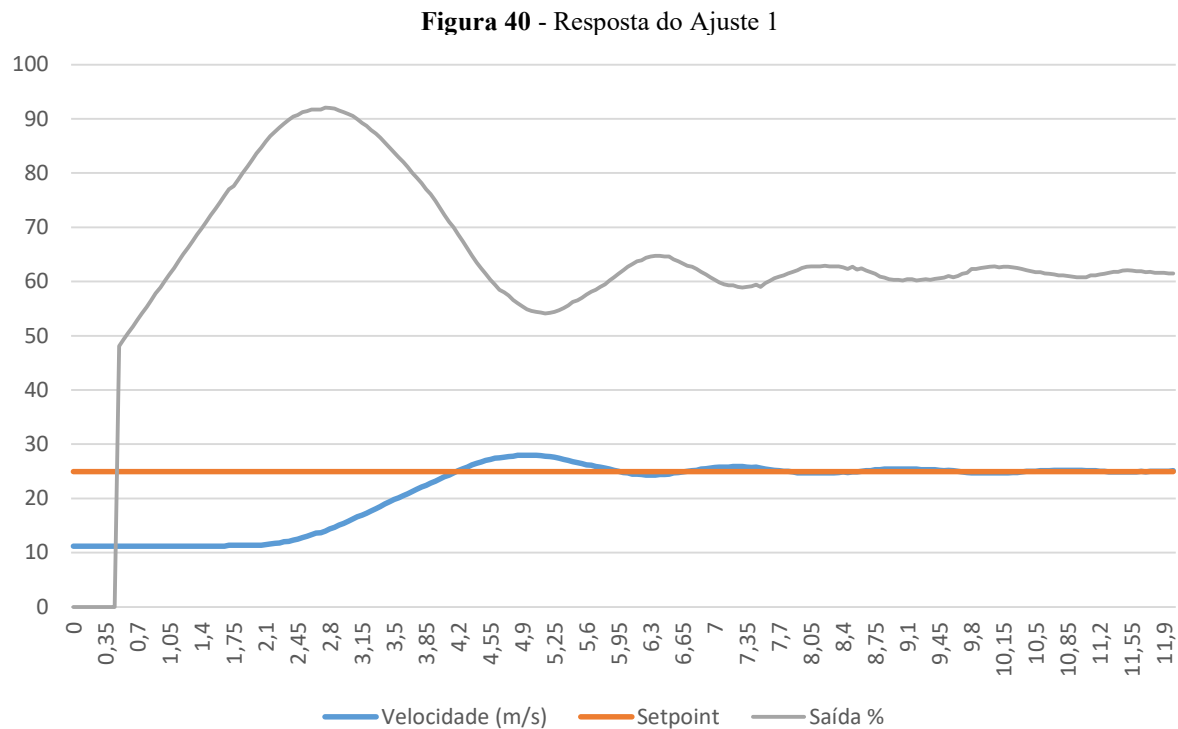
Fonte: Autor (2022)

- Ajuste 1 - Ferramenta de autotuning do software para resposta rápida
- Ajuste 2 - Método de frequência para uma resposta lenta (Tabela 10)
- Ajuste 3 - Método de degrau para uma resposta rápida (Tabela 9)
- Ajuste 4 – Ajuste manual.

Cabe lembrar da limitação do ADC do esp32, citado nas seções 4.5.1 e 4.6, que impede a leitura de velocidades muito baixas devido a tensão gerada pelo sensor ser inferior a 150mV. Como pode ser visto a seguir, essa limitação se reflete como sendo uma velocidade de aproximadamente 10 m/s devido a correção aplicada nas leituras feitas pelo ADC.

Na figura 40 pode ser observado um degrau aplicado a partir do repouso do motor até a velocidade de 25 m/s. Neste caso foi utilizando o ajuste 1 como referência para o controle, sendo os parâmetros sintonizados a partir do mecanismo de autotuning do Labview, que

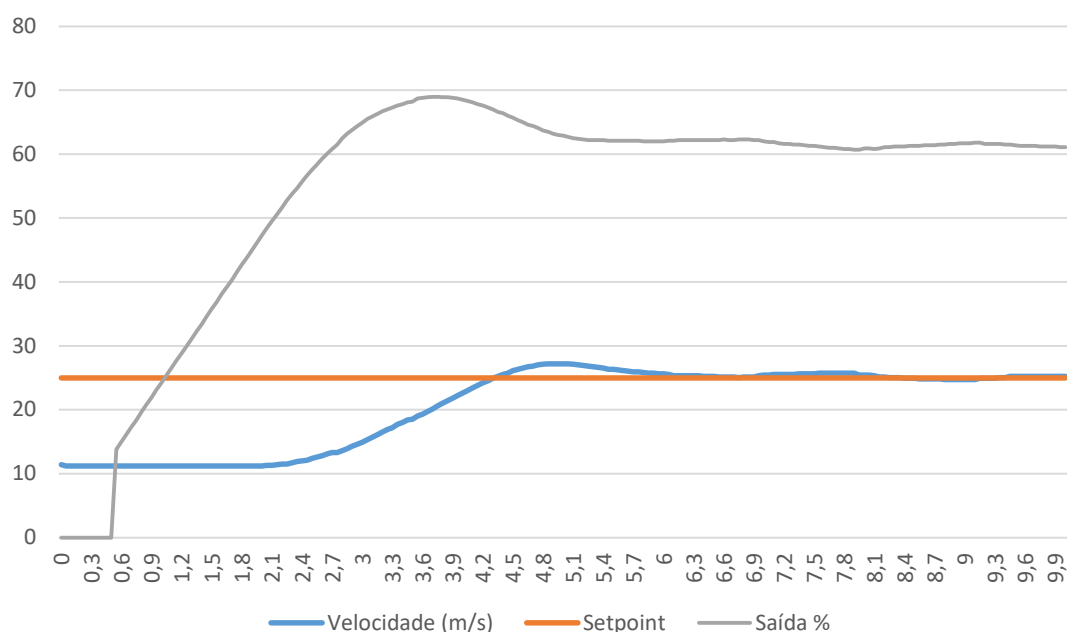
apresentou melhor resultado para um controle PI. Os resultados obtidos podem ser observados na figura 40, mostrando que o tempo de assentamento ou estabilização (T_A) foi de aproximadamente 6 segundo. Também é possível notar que o sinal de saída (saída %) para controle de rotação do motor não apresentou oscilações bruscas, o que corrobora para um controle bem estável e com preservação mecânica do ventilador centrífugo.



Fonte: Autor (2022)

A mesma análise pode ser feita para o Ajuste 4, apresentado na Figura 41, em que foi realizado sintonia manual. Neste caso, para o mesmo degrau aplicado, o tempo de estabilização também foi de aproximadamente 6 segundos, porém, cabe destacar que o sinal de saída para o inversor de frequência (saída %) permitiu um controle ainda mais suave, com menor oscilação de rotação do ventilador, como pode ser observado na curva cinza (saída%). Isto também colaborou para que fosse obtido na resposta um overshoot de menor amplitude, no entanto, com diferenças muito sutis para o controle PI apresentado na Figura 40 (Ajuste 1).

Figura 41 - Resposta do Ajuste 4

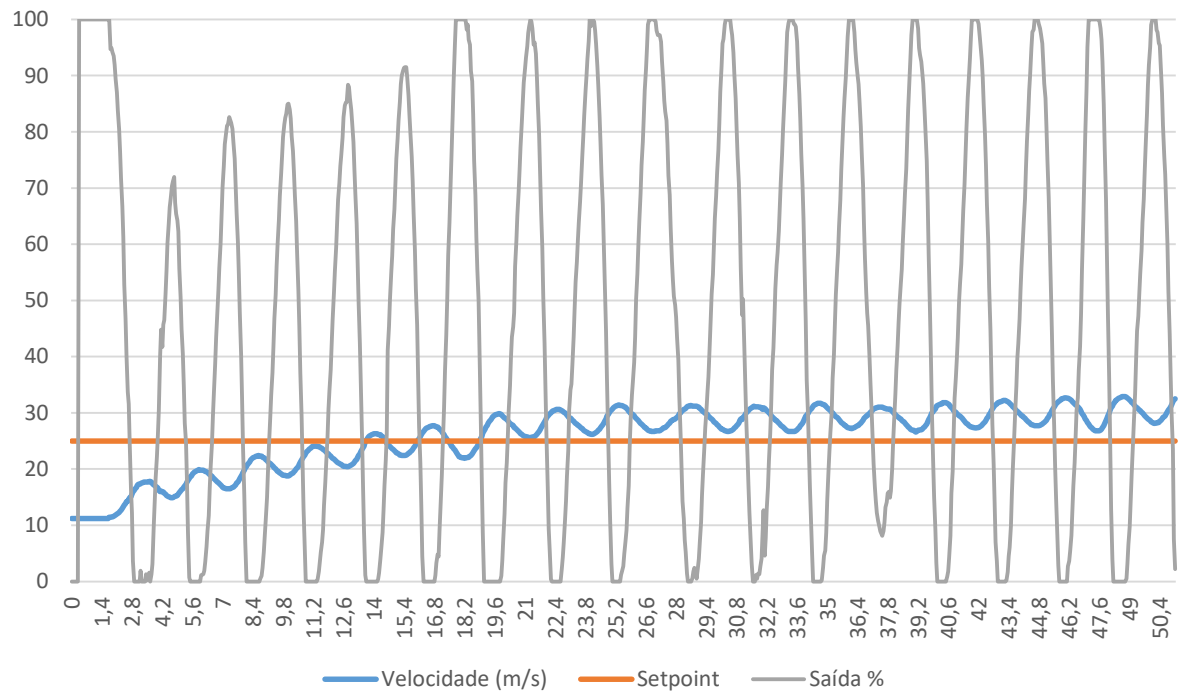


Fonte: Autor (2022)

De acordo com Neves (2009) o ajuste por autotuning dos controladores PID possuem algumas vantagens frente a sintonia manual, dentre as quais se destacam: o tempo de estimação reduzido, obtenção de controle estável e eficiente, à primeira estimação e sua implementação não requer um conhecimento aprofundado de controle. No entanto, a sintonia manual é muito importante para sistemas onde devido à dinâmica ou perturbações existentes, não é possível utilizar autotuning. A sintonia manual também permite atingir níveis excepcionais de eficiência, e a maior vantagem está na capacidade humana de análise, que foi o que pode ser constatado no Ajuste 4 realizado.

No trabalho também foi avaliada a sintonia utilizando o método de frequência para uma resposta lenta (Tabela 10), no entanto, os resultados encontrados não apontaram para estabilização, como pode ser observado na Figura 42, que apresenta o melhor resultado de controle (Ajuste 2), mas ainda com oscilações muito bruscas no sinal de saída, o que prejudicou efetivamente a estabilidade do controle, além de impactar sensivelmente nas partes moveis do ventilador centrífugo. Neste caso, o controle PI também foi o que melhor se aplicou ao processo, como pode ser observado na Tabela 11, mas como destacado anteriormente, sem sucesso.

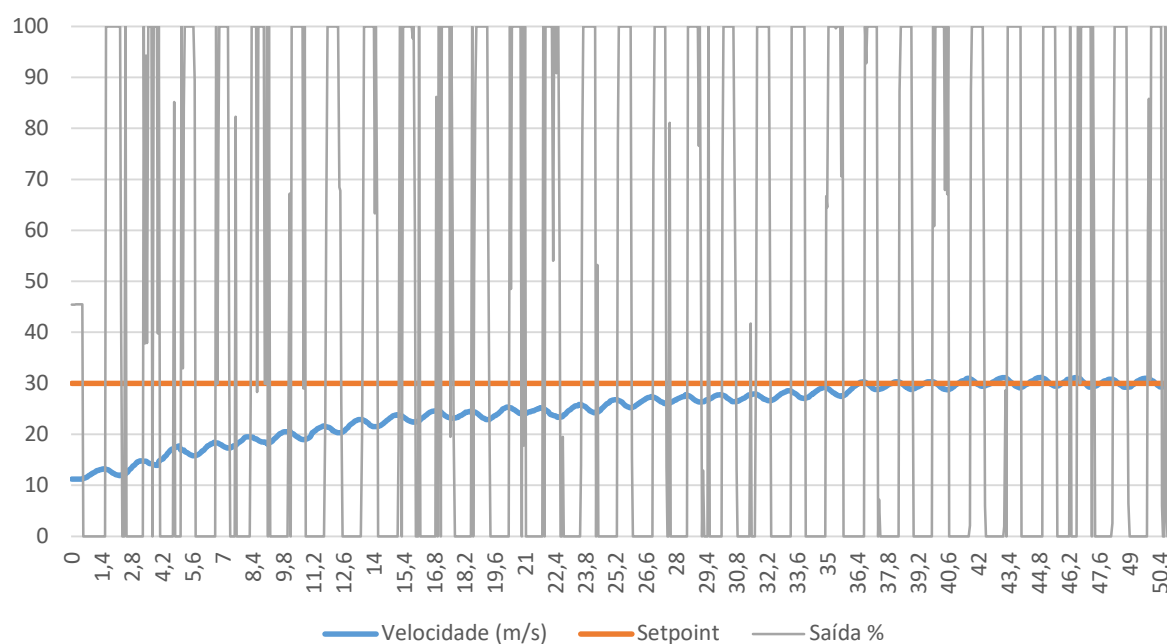
Figura 42 - Resposta do Ajuste 2



Fonte: Autor (2022)

Da mesma forma em que foi avaliado a melhor sintonia para o método de frequência, também foi avaliado para o método de degrau (Tabela 9). Neste caso, um PID foi o que melhor resultados apresentou (Ajuste 3), no entanto, de forma semelhante à sintonia pelo método de frequência, o controle não estabilizou (Figura 43). O que é possível observar de diferente é que a frequência de oscilação do motor foi intensificada, o que aumenta ainda mais o desgaste dos seus componentes móveis em caso de utilização contínua.

Figura 43 - Resposta do Ajuste 3

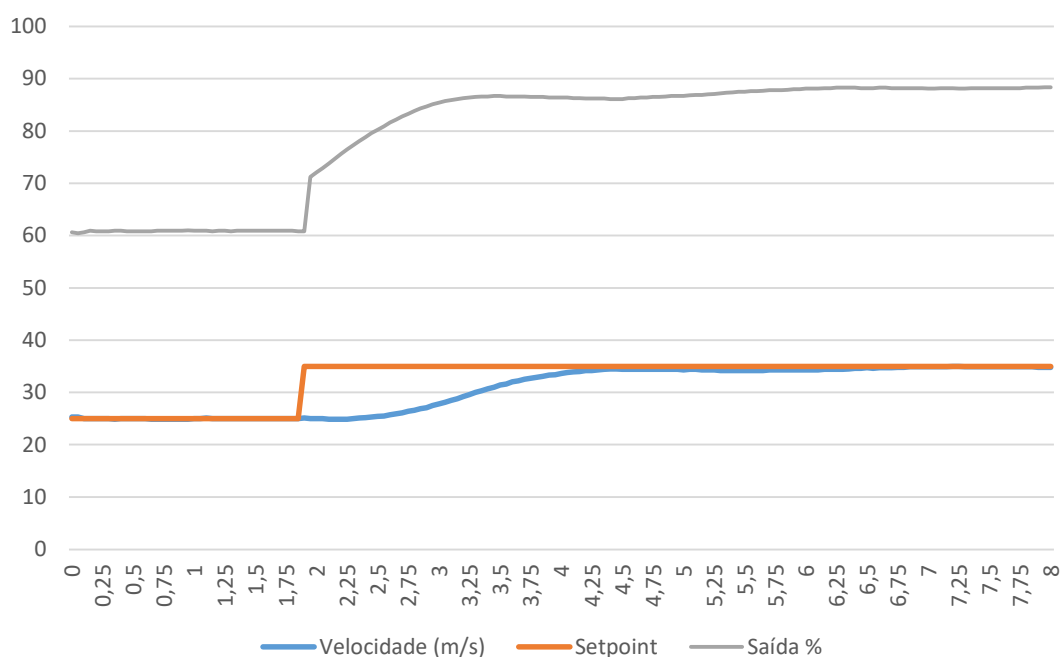


Fonte: Autor (2022)

Portanto, é possível afirmar que a melhor sintonia para o processo de controle de velocidade do ar foi a manual (Ajuste 4 - Tabela 11), sendo realizado mais alguns testes para verificar a eficiência do controle a partir do microcontrolador esp32, obtendo-se os seguintes resultados (Figuras 44 e 45). Em cada resultado podem ser observados as curvas azul, laranja e cinza, que são respectivamente, a velocidade do ar medida do sistema em m/s (PV), a velocidade de setpoint desejada em m/s (SP) e a resposta percentual que está sendo enviada para o controle de rotação do ventilador centrífugo (CV).

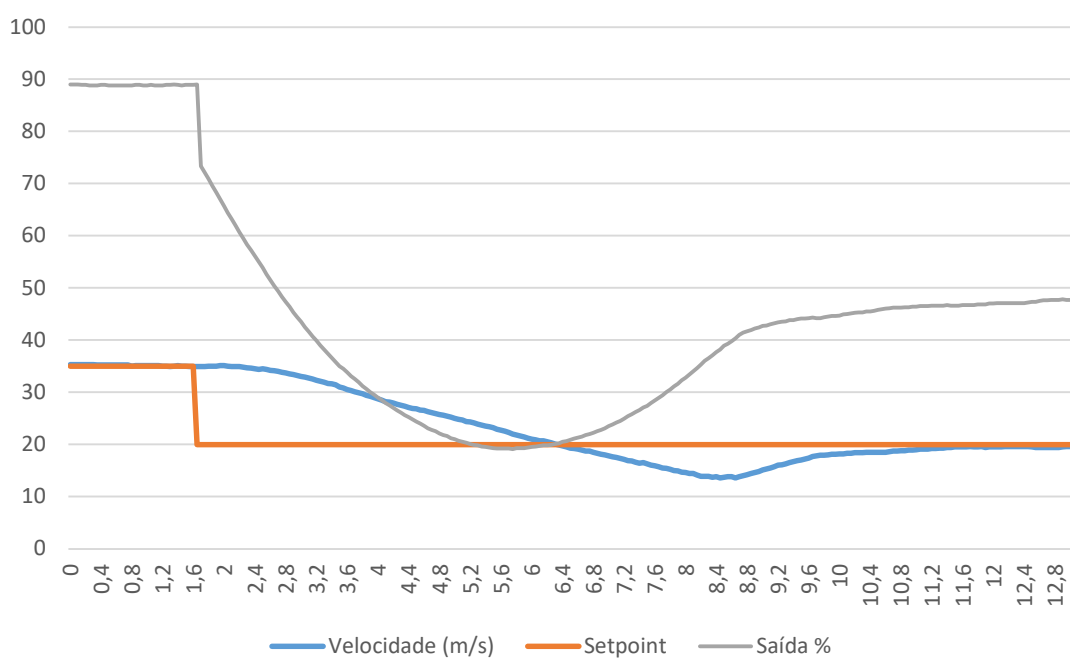
Na figura 44 é apresentado o desempenho do controle para o processo inicialmente a 25 m/s, quando então, é aplicado um degrau de setpoint para 35m/s, enquanto na Figura 45 o sistema estava inicialmente em 35m/s e foi aplicado um degrau de setpoint para 20m/s.

Figura 44 - Teste 1: resposta do sistema à um degrau de setpoint



Fonte: Autor (2022)

Figura 45 - Teste 2: resposta do sistema à um degrau de setpoint



Fonte: Autor (2022)

Em ambos os degraus aplicados, observa-se uma excelente estabilidade do controle, garantindo que para o processo estudado, os ganhos de controle PI sintonizados manualmente (Ajuste 4) podem ser utilizados como padrão de operação da unidade experimental desenvolvida.

CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que o esp32 se apresenta como uma alternativa de baixo custo para o controle de velocidade e que é possível controlar a vazão de escoamento do ar com um pitot, pois o perfil de velocidade não sofre alteração significativa em regime turbulento, como foi evidenciado nos resultados.

O controle PI utilizado apresentou um bom desempenho, sendo possível fixar uma velocidade de setpoint desejada mesmo com oscilações causadas ao sistema.

Com essa plataforma, espera-se contribuir com a formação de profissionais na área de Engenharia Elétrica e de Controle e Automação do IFG, proporcionando mais uma ferramenta que ajude a desenvolver suas habilidades, além de contribuir para a infraestrutura dos laboratórios do campus Itumbiara.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar a modelagem matemática do sistema, sendo possível determinar com maior precisão o comportamento do sistema e aplicar novas técnicas de controle para determinar os ganhos do controlador PID.
- Desenvolvimento de um condicionador de sinal que seja capaz de aplicar um somador de tensão configurável entre $0 \sim 0,2V$ e um ganho variável para controlar o valor de tensão máximo de tensão para $3,3V$, pois essa é a melhor faixa de leitura do ADC do esp32.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR ISO 5167-1**. 28 de janeiro de 2008.

BOJORGE, N. **Sistemas de Medição de Vazão**. Departamento de Engenharia Química e de Petróleo – UFF. 2017. Disponível em: https://www.professores.uff.br/ninoska/wp-content/uploads/sites/57/2017/08/Aula05_Instrumen_Vazao1sem2016.pdf. Acessado em: 19 de março de 2022.

DALENOGARE, Lucas Santos et al. **O impacto da indústria 4.0 no modelo de negócios de empresas de automação brasileiras**. Iberoamerican Journal of Industrial Engineering, v. 11, n. 21, p. 1-13, 2019.

ESPRESSIF, **Analog to Digital Converter**, 2022. Disponível em: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/v4.4.1/esp32/api-reference/peripherals/adc.html>. Acessado em: 16 de junho de 2021.

ESPRESSIF, **Esp32 Series Datasheet**, 2022. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3_datasheet_en.pdf. Acessado em: 16 de junho de 2021.

FREDERICO M. C. V. **Anemômetros: definições e uso em estudos de transporte de fran-
gos de corte**. Novembro de 2006. Disponível em: <http://www.leb.esalq.usp.br/leb/aulas/lce5702/Anemometro.pdf>. Acessado em: 16 de junho de 2021.

FLUXCON. **Retificadores de Fluxo**. 2022. Disponível em: <http://www.fluxcon.com.br/produto-interno/23>. Acessado em: 20 de junho de 2022.

GOEKING, Weruska. Da máquina a vapor aos softwares de automação. **O setor elétrico, São Paulo**, v. 52, p. 70-77, 2010.

GUTIERREZ, R. M. V.; PAN, S. S. K. **Complexo eletrônico: automação do controle indus-
trial**. 2008.

HALLIDAY E RESNICK, **Fundamentos de Física Gravitação, Ondas e Termodinâmica**. Volume 2, 10ª edição, 30 junho 2016.

JOSÉ, A. N. **Introdução ao processamento digital de sinais**. Editora LTC, 2009.

MASSARO, L. **Minicurso - Vazão**. Schneider Eletric. 2020. Disponível em: <http://isasp.org.br/wp-content/uploads/2020/01/ISA-S%C3%A3o-Paulo-Section-Palestra-T%C3%A9cnica-Medi%C3%A7%C3%A3o-de-Vaz%C3%A3o.pdf>. Acessado em: 19 de março de 2022.

MINIPA. **MDA-20**. 2022. Disponível em: <https://www.minipa.com.br/temperatura-e-ambiente/anemometros/136-mds-20>. Acessado em: 20 de março de 2022.

NI. LabVIEW. **PID Autotuning VI**. 03 de maio de 2022. Disponível em: https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/labview/page/lvpid/pid_with_autotuning.html. Acessado em: 10 de junho de 2022.

NI. LabVIEW. **Implementing Autotuning with the Autotuning Wizard**. 03 de maio de 2022. Disponível em: https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/labview/page/lvpid-main/pid_autowiz.html. Acessado em: 10 de junho de 2022.

NI. LabVIEW. **Ziegler-Nichols Autotuning Method**. 30 de abril de 2022. Disponível em: <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/labview-2021/page/lvpidmain/ziegnichforms.html>. Acessado em: 10 de junho de 2022.

NI. LabVIEW. **PID Relay Autotuning Technique**. 30 de abril de 2022. Disponível em: https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/labview-2021/page/lvpidmain/pidrelay_alg.html. Acessado em: 10 de junho de 2022.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. Tradução Heloísa Coimbra de Souza; 5ªed. Pearson Prentice Hall, 2010.

OLIVEIRA, C. M. et al. **A importância das atividades práticas no ensino de Engenharia do Produto: um exemplo bem-sucedido de prototipagem de baixo custo**. XXIV Simpósio de Engenharia de Produção, p. 1-14, 2017.

PAULA, I. B. **Medição de Vazão**. PUC Rio - Laboratório de Engenharia de Fluidos. 2015. Disponível em: <http://lef.mec.puc-rio.br/wp-content/uploads/2015/05/Medidas-de-Vaz%C3%A3o.pdf>. Acessado em: 19 de março de 2022.

ROSARIO, Joao Mauricio. **Automação industrial**. Editora Baraúna, 2012.

SACRAMENTO R. C. F. **Capítulo 8 -Transportador pneumático**, 2012. UFBA. Disponível em: http://www.transportedegraneis.ufba.br/apostila/cap8_tp.pdf. Acessado em: 18 de março de 2022.

SIGMA. **Anemômetro**. 2022. Disponível em: https://sigmasensors.com.br/anemometro?gclid=CjwKCAjwzeqVBhAoEiwAOrEmzZWxu-hFleARA8VX-49uW-CLG3NvIMzBy7wNKqSkFqUQWErSMTTwd6RoCNq0QAvD_BwE. Acessado em: 20 de março de 2022.

SILVA, J. S.; AFONSO, A. D. L.; DONZELLES, S. M. L. **Secagem e secadores**. Cap. 5. Disponível em: <https://www.agricultura.rs.gov.br/upload/arquivos/201811/23093833-secagem-e-armazenagem-cap5.pdf>. Acessado em: 19 de março de 2022.

UFPR. **Medição de Velocidade e Vazão em fluidos**. 2015. Disponível em: <http://ftp.de-mec.ufpr.br/disciplinas/TMEC047/Aulas/Cap-9-Velocidade%20e%20Vaz%E3o%20em%20Fluidos.pdf>. Acessado em: 19 de março de 2022.

YOKOGAWA. **Vortex Flowmeters**. 2022. Disponível em: <https://www.yokogawa.com/bh/solutions/products-platforms/field-instruments/flow-meters/vortex-flow-meters/digitalyewflo-dy/#Details>. Acessado em: 20 de junho de 2022.

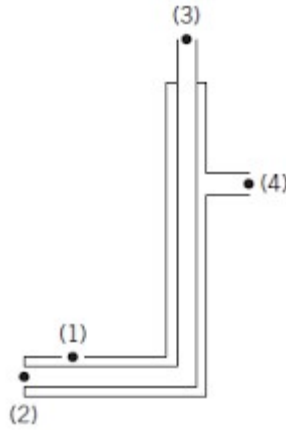
ÇENGEL, Y A, AND J M CIMBALA. 2015. **Mecânica Dos Fluidos - 3.Ed.** AMGH Editora. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=aP3OBgAAQBAJ>. Acessado em: 10 de junho de 2022.

APÊNDICE A

A.1. Determinação da velocidade medida no pitot

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{constante (Equação de Bernoulli)}$$

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2$$



Adotando uma altura inicial igual à final entre os pontos 1 e 2, velocidade no ponto 2 nula, pelo motivo de ser um ponto de estagnação, e que a leitura de pressão será feita nos pontos 3 e 4, onde $P_1 = P_4$, assim como $P_2 = P_3$, temos:

$$v_1^2 = \frac{2(p_2 - p_1)}{\rho}$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

v : velocidade no ponto;

ρ : densidade do fluido;

ΔP : diferencial de pressão em Pa.

A.2. Sensor de Pressão

O modelo de sensor utilizado, possui a seguinte função de transferência:

$$V_{out} \cong \frac{\Delta P}{400}$$

ΔP : pressão diferencial em Pa

Aplicando o circuito condicionador de sinal projetado, temos:

$$V_{out} \cong \frac{\Delta P}{666,666}$$

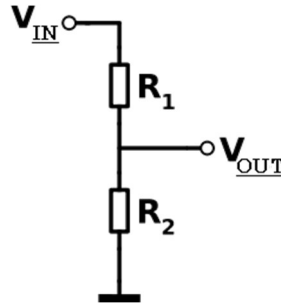
Isolando o valor de ΔP , também temos:

$$\Delta P \cong 666,666V_{out}$$

Substituindo o valor de ΔP na equação de velocidade definida a partir da equação de Bernoulli, temos o seguinte resultado:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2(666,666V_{out})}{\rho}}$$

A.3. Ganho do condicionador de sinal



$$V_{in} = RI$$

$$R = R_1 + R_2$$

$$V_{in} = (R_1 + R_2)I$$

$$V_{out} = R_2I$$

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_2I}{(R_1 + R_2)I} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

A.4. Cálculo da velocidade média

$$V_{med} = \frac{\iint V_{max} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} dA}{\pi R^2}$$
$$dA = r dr d\theta$$
$$V_{med} = \frac{\iint V_{max} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} r dr d\theta}{\pi R^2} = \frac{V_{max}}{\pi R^2} * \left(\int_0^R \int_0^{2\pi} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} r dr d\theta \right)$$
$$V_{med} = \frac{V_{max}}{\pi R^2} \int_0^R \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} 2\pi r dr$$
$$V_{med} = \frac{2V_{max}}{R^2} \int_0^R \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} r dr$$

A.5. Programação final utilizada no esp32

```
#include <driver/adc.h>

int analog_value = 0;
int resp_LabView = 0;
String character = "";
String palavra = "";

int valor_media = 0;
int valor_media_erro = 0;
int amostras[20];
int qtd_amostras = 20; //igual ao tamanho do vetor de amostras
long sum = 0;

int freq = 1000;
int ledChannel = 0;
int pin = 33; //33 se refere a gpio 33
int resolution = 12;
int dutyCycle = 0;

double media_movel(int y) {
    sum = 0;
    for(int i=0; i<qtd_amostras-1; i++){
        amostras[i] = amostras[i+1];
        sum += amostras[i+1];
    }
    amostras[qtd_amostras-1] = y;
    sum += y;
    return sum/qtd_amostras;
}

void setup() {
    // initialize serial communication at 9600 bits per second:
    Serial.begin(9600);
    delay(1000); // give me time to bring up serial monitor
```

```

ledcSetup(ledChannel, freq, resolution);
ledcAttachPin(pin, ledChannel);

adc1_config_width(ADC_WIDTH_BIT_12);
adc1_config_channel_atten(ADC1_CHANNEL_4,ADC_ATTEN_MAX); // gpio 32
}

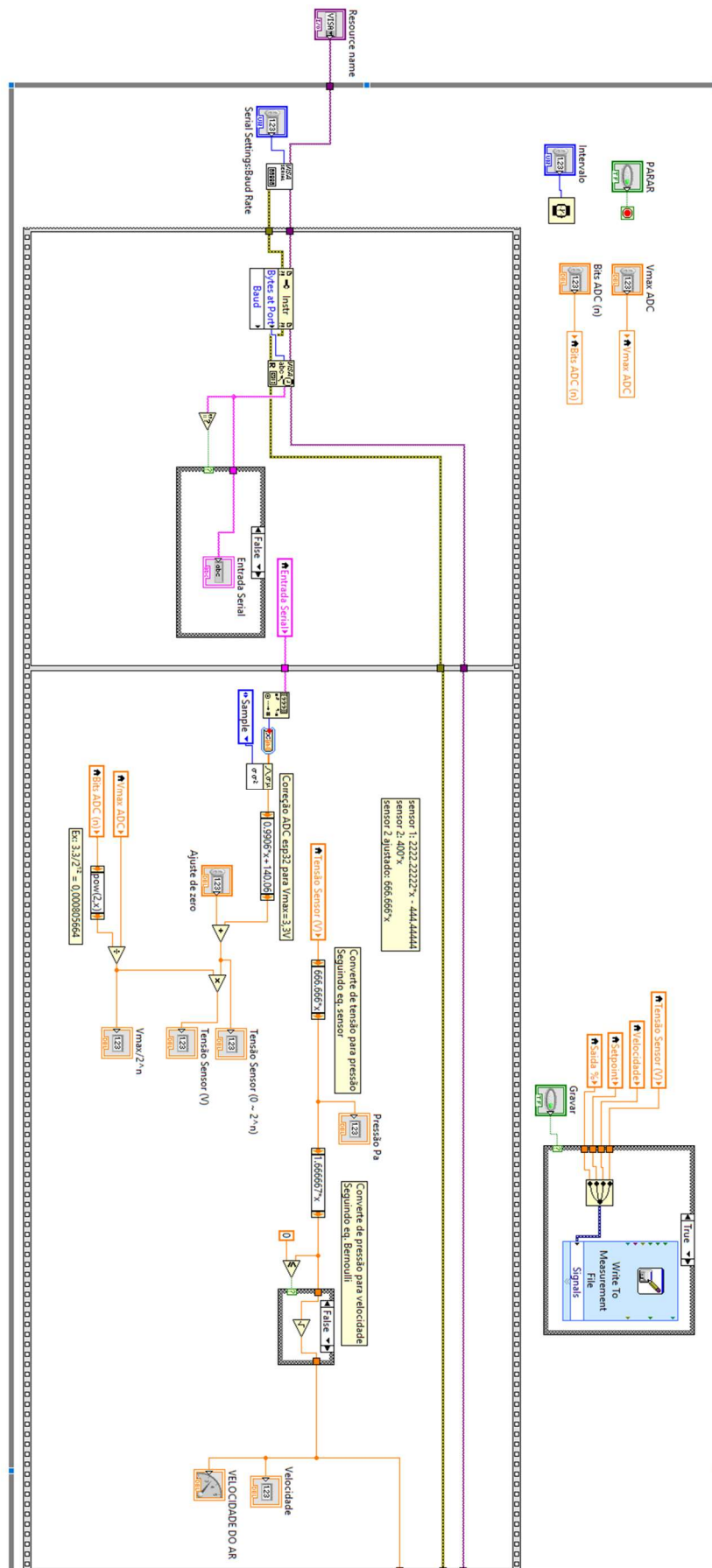
// the loop routine runs over and over again forever:
void loop() {

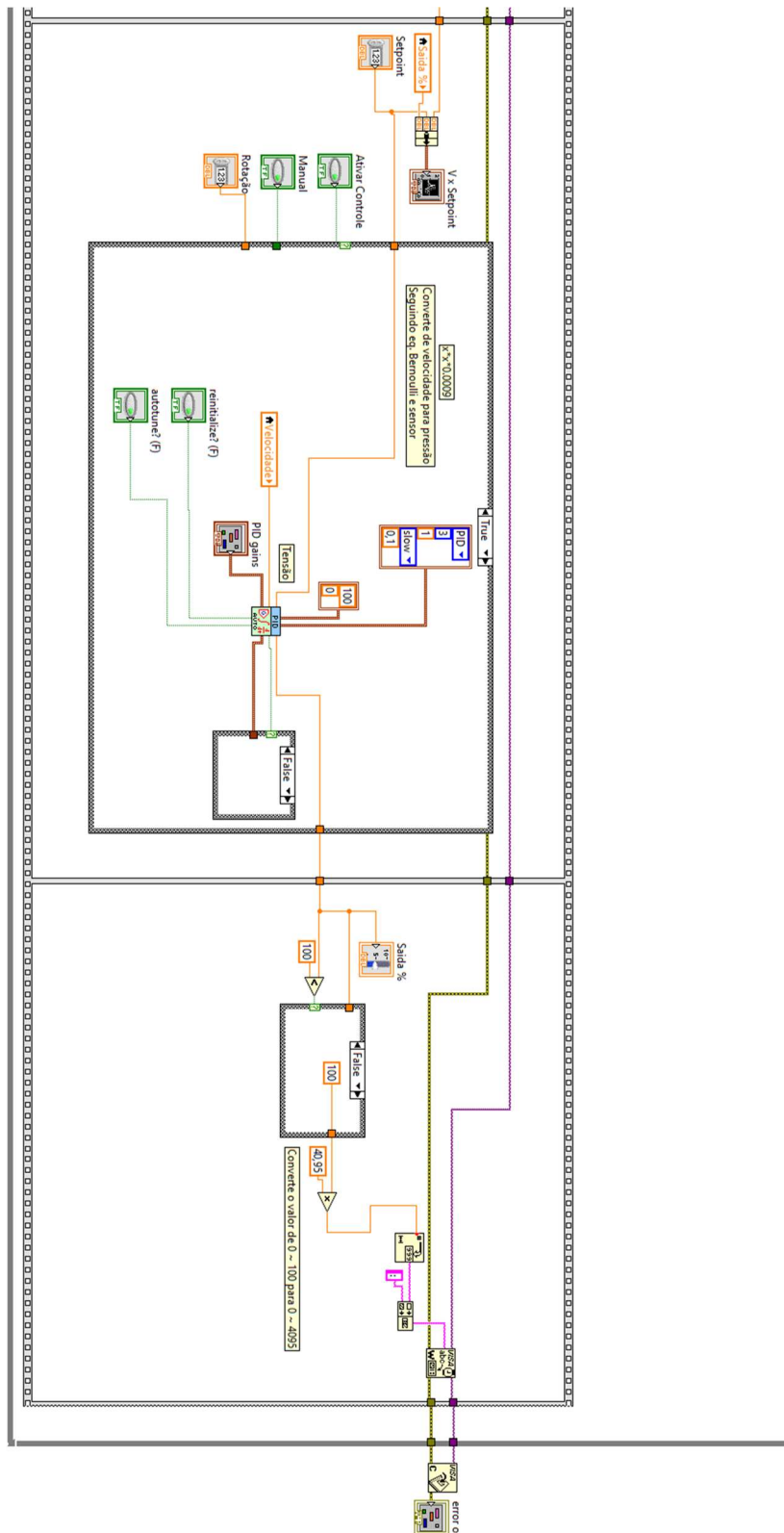
while(Serial.available()>0){
  character = (char)Serial.read();
  if(character == ":"){
    resp_LabView = palavra.toInt();
    palavra = "";

    if (resp_LabView >= 0 && resp_LabView <= 4095) {
      //escrevo o valor na porta PWM onde sera conectado um conversor PWM para analogico
      dutyCycle = resp_LabView;
      ledcWrite(ledChannel, dutyCycle);
    }
    analog_value = adc1_get_raw(ADC1_CHANNEL_4); // ler o ADC1_CH4, que está associado ao GPIO 32
    valor_media = media_movel(analog_value);
    Serial.print(valor_media);
    break;
  }
  else palavra = palavra + character;
}
}

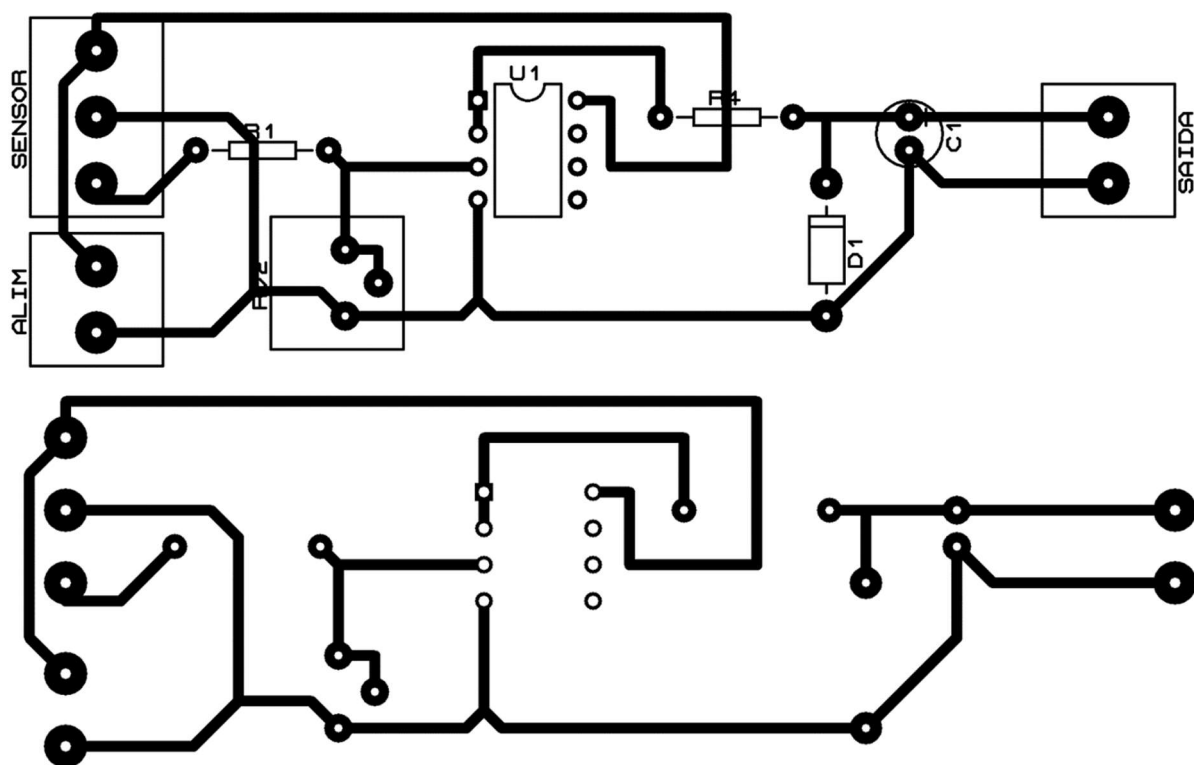
```

A.6. Programação final LabView





A.7. Circuito de condicionamento do sinal do sensor



APÊNDICE B

B.1. Exemplo configuração ADC1_CH0

```
#include <driver/adc.h>
...
adc1_config_width(ADC_WIDTH_BIT_12);
adc1_config_channel_atten(ADC1_CHANNEL_0,ADC_ATTEN_DB_0);
int val = adc1_get_raw(ADC1_CHANNEL_0);
```

B.2. Configuração de teste para uma saída PWM

```
int freq = 1000;
int ledChannel = 0;
int ledPin = 0;
int resolution = 8;
void setup() {
    ledcSetup(ledChannel, freq, resolution);
    ledcAttachPin(ledPin, ledChannel);
}
void loop() {
    for (int dutyCycle = 0; dutyCycle <= 255; dutyCycle++) {
        ledcWrite(ledChannel, dutyCycle);
        delay(7);
    }
    for (int dutyCycle = 255; dutyCycle >= 0; dutyCycle--) {
        ledcWrite(ledChannel, dutyCycle);
        delay(7);
    }
}
```

B.3. Código de teste para comunicação serial

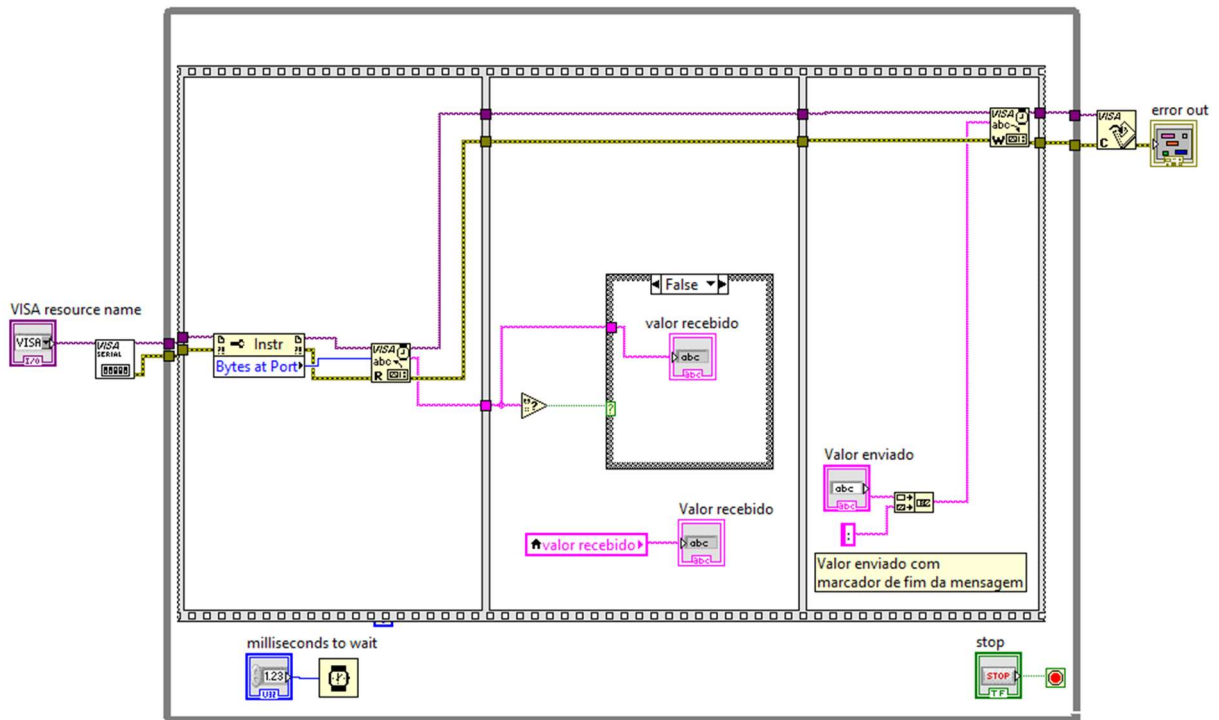
```
String palavra, character;
void setup() {
    Serial.begin(9600);
}
void loop() {
    while(Serial.available()>0){
        character = (char)Serial.read();
        if(character == ":"){
            Serial.print(palavra);
            palavra = "";
            break;
        }
    }
}
```

```

    }
    else palavra = palavra + character;
  }
}

```

B.4. LabView para teste comunicação serial



B.5. Link para acessar pasta de arquivos

Neste link pode ser encontrado o arquivo do LabView e a programação utilizada no esp32.

Link: <https://1drv.ms/f/s!AmkwxkvCpoL8g7sZS-McT7OyWIGlIQ>