

UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

YURI SILVA CRUZ STORINO

AUTOMAÇÃO DIGITAL VOLTADA PARA ESTUDOS DE TRANSPORTE
PNEUMÁTICO DE GRÃOS

SANTOS/SP
2024

YURI SILVA CRUZ STORINO

**AUTOMAÇÃO DIGITAL VOLTADA PARA ESTUDOS DE TRANSPORTE
PNEUMÁTICO DE GRÃOS**

Dissertação apresentada a Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, sob a orientação do Prof. Dr. Carlos José de Lima.

SANTOS/SP

2024

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe por toda inspiração, a meu pai por todos seus ensinamentos, pois sem estes, estes resultados nunca seriam alcançados.

AGRADECIMENTOS

A minha mãe, Edna Silva Cruz Storino, que mesmo depois de seu falecimento, me deu inspiração, principalmente profissional, e com meios para que minha formação acadêmica pudesse ser possível.

A meu pai, José Storino, a quem dedicou sua vida como meu pai, por todos os ensinamentos, morais e éticos, incentivando meu desenvolvimento acadêmico e me dando referência de um bom homem e do melhor pai nesta vida.

Aos meus colegas, Kelly Cristina Abou Arabi de Mendonça, Raquel Galhardo de Carvalho Lopes Araújo, Luis Fernando Pompeo Ferrara, Álvaro Luiz Moreira Conrado, Volnei Lemos e Ricardo Steger Giangiulio, que incentivaram a minha permanência e superação de obstáculos nesta jornada.

E por fim, agradeço a Deus pela vida me fornecida e por iluminar todo meu caminho, até aqui e ao há por vir.

RESUMO

O transporte de sólidos desempenha um papel de extrema importância em diversos setores, como o industrial, rural e portuário. Entre as modalidades de transporte, destaca-se o transporte pneumático, caracterizado pelo transporte de pós e grãos por meio de fluídos em condições dinâmicas. Para fins de estudo, experimentos são realizados em protótipos com o objetivo de avaliar diferentes características desse tipo de transporte, sendo de grande relevância a utilização de tecnologias, como automações digitais, para otimizar os resultados das pesquisas. O presente trabalho descreve o desenvolvimento de uma automação controlada de baixo custo, aplicada a protótipos de transporte pneumático voltados para experimentos laboratoriais. Utiliza-se um controlador Arduino Mega 2560 Rev03, que monitora a pressão por meio de sensores MDS20N0040D-S e a umidade com sensores DHT11. O sistema controla também o motor do alimentador de grãos por meio de um circuito dedicado e gera relatórios digitais com os dados de pressão e umidade coletados, utilizando um aplicativo para computador. Os testes de calibração realizados em uma unidade experimental resultaram em erros percentuais menores em pressões mais altas, além disso, foi comprovada a capacidade de medir a pressão em pontos de mudança de direção das tubulações. O sistema também permite o monitoramento contínuo e a geração de relatórios com medições a cada segundo.

Palavras Chave: Transporte pneumático, Automação, Experimentos laboratoriais.

ABSTRACT

The transportation of solids plays a crucial role in various sectors, such as industrial, agricultural, and port industries. Among the different transportation methods, pneumatic transport stands out, characterized by the transportation of powders and grains through fluids under dynamic conditions. For study purposes, experiments are conducted on prototypes with the goal of evaluating different characteristics of this transportation method, with the use of technologies, such as digital automation, being of great importance to optimize research outcomes. This paper describes the development of a low-cost controlled automation, applied to pneumatic transport prototypes for laboratory experiments. An Arduino Mega 2560 Rev03 controller is used, which monitors the pressure through MDS20N0040D-S sensors and humidity with DHT11 sensors. The system also controls the motor of the grain feeder through a dedicated circuit and generates digital reports with the collected pressure and humidity data, using a computer application. The calibration tests performed on an experimental unit resulted in smaller percentage errors at higher pressures. Furthermore, the system demonstrated the ability to measure pressure at points of change in the direction of the piping. The system also allows for continuous monitoring and the generation of reports with measurements taken every second.

Keywords: Pneumatic Conveyor, Automation, Laboratory Experiments

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração de transporte pneumático de pressão negativa. Adaptado de (KLEENAIR SYSTEMS, 2014).	14
Figura 2 – Ilustração de transporte pneumático de pressão positiva (LOURENÇO, 2019).	14
Figura 3 – Ilustração de transporte pneumático em fase densa (a) e fase diluída (b). Adaptado de (MACAWBER ENGINEERING, INC., 2024)	15
Figura 4 - CLP SIMATIC S7-1200 (SIEMENS, 2023)	17
Figura 5 - Raspberry Pi 4 model B (RASPERRY PI TRADING LTD., 2023)	17
Figura 6 - Arduino UNO R3 (ARDUINO, 2023)	18
Figura 7 – Interface para Sistema de Automação Residencial para celulares (ARGENTA; FRANCISCO, et al., 2020).....	19
Figura 8 – IHM Mercurio (SILOTTI; IAIONE; MINAKAWA, 2022)	19
Figura 9 – Unidade piloto de transportador pneumático em fase diluída, construído no laboratório de operações unitárias da Universidade Santa Cecília. Itens: 1) a 10) Pontos de tomadas de pressão dos tubos do manômetro em “U”; a) Tubulação de entrada do ar de alimentação com anemômetro; b) Duto de sucção do ventilador de 223 mm de diâmetro interno e comprimento de 610 mm; c) Ventilador centrífugo de 228 mm de diâmetro com motor de 3hp e 2,9 A; d) Silo com válvula rotativa; e) Inversor de frequência do motor do ventilador; f) controlador de velocidade da válvula rotativa; g) Tê saída de lado; h) Banco de tubos em “U” para medida de pressão estática; i) Ciclone (MESSIAS; BERTELLI, et al., 2024)	21
Figura 10 – Mecanismo de ventilação da Unidade Piloto (AUTOR, 2022).....	22
Figura 11 - Mecanismo de ventilação da Unidade Piloto visto de lado (AUTOR,2023)	22
Figura 12 – Localização dos anéis piezométricos a serem automatizados, em uma ilustração da unidade piloto (AUTOR, 2024)	23
Figura 13 – Anel piezométrico do ponto 7 (AUTOR, 2024)	23
Figura 14 - Manômetro em U vista frente com água e corante verde da Unidade Piloto (AUTOR, 2022)	24
Figura 15 - Alimentador de grãos da Unidade Piloto (AUTOR, 2022)	24
Figura 16 - Motor do alimentador da Unidade Piloto (AUTOR, 2022)	25
Figura 17 - Controlador de velocidade do alimentador da Unidade Piloto (AUTOR, 2022)	25
Figura 18 – Ilustração da arquitetura de componentes da automação desenvolvida (AUTOR, 2024).	26
Figura 19 - Arduino Mega 2560 (ARDUINO).....	27
Figura 20 - Sensor MDS20N0040D-S (E-RADIONICA)	29
Figura 21 - Sensor DHT11 (GUANGZHOU AOSONG ELECTRONICS CO., LTD., 2022).....	30
Figura 22 - Ilustração do sistema de calibração utilizando a conexão Y, êmbolo e um manômetro em U como referência (AUTOR,2023)	33
Figura 23 - Placa de controle da automação, com o Arduino e seus componentes de conexão (AUTOR, 2023)	36
Figura 24 – Gráfico de erro médio absoluto percentual de cada sensor instalado nos anéis piezométricos (AUTOR, 2024).....	38
Figura 25 – Interface em linguagem Python da automação desenvolvida (AUTOR, 2023)	39
Figura 26 – Flutuação percentual dos valores adquiridos do sensor do anel piezométrico 4, em relação ao aumento da velocidade do ar na tubulação, com sua linha de tendência, equações destas linhas e o coeficiente de correlação de Pearson (AUTOR, 2024)	41
Figura 27 – Comparação da flutuação percentual de valores adquiridos dos sensores dos anéis piezométricos 6, 7 e 8, conforme o aumento da velocidade de ar na tubulação, com suas linhas de tendências, equações destas linhas e o coeficiente de correlação de Pearson (AUTOR, 2024).....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Recursos do Arduino Mega 2560 (ARDUINO).....	27
Tabela 2 – Portas de comunicação serial e seus pinos no Arduino Mega 2560	28
Tabela 3 - Características do sensor de pressão MDS20N0040D-S (E-RADIONICA)	29
Tabela 4 - Características do conversor analógico digital HX711 (AVIA SEMICONDUCTOR).....	29
Tabela 5 - Características do sensor de umidade DHT11 (GUANGZHOU AOSONG ELECTRONICS CO., LTD., 2022)	30
Tabela 6 – Equações adquiridas pela calibração individual dos sensores, para mmca(AUTOR,2023) .	35
Tabela 7 - Erro percentual da medição de calibração dos sensores de pressão (AUTOR, 2024).....	35
Tabela 8 - Velocidades medidas com anemômetro na entrada de ar da unidade piloto, e sua média calculada. (AUTOR, 2023).....	37
Tabela 9 – Erro percentual de cada sensor instalado na unidade piloto, em relação ao manômetro em U de referência (AUTOR, 2023).....	37
Tabela 10 - Erro percentual de cada sensor instalado no trabalho comparativo (SILVA, 2021).....	39

LISTA DE SIGLAS

CLP	-	Controlador lógico programável
CPU	-	<i>Central Processing Unit</i>
IDE	-	<i>Integrated Development Enviroment</i>
IoT	-	<i>Internet of Things</i>
MAE	-	<i>Mean Absolute Error</i>
PCB	-	<i>Printed Circuit Board</i>
PVC	-	<i>Polyvinyl chloride</i>
PWM	-	<i>Pulse Width Modulation</i>
RH	-	<i>Relative Humidity</i>
USB	-	<i>Universal Serial Bus</i>
XLSX	-	<i>Microsoft Excel Spreadsheet</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

μm	-	Micrometro
cm	-	Centímetro
kg/m^3	-	Quilograma por metro cúbico
t/m^3	-	Tonelada por metro cúbico
kPa	-	Quilo Pascal
m/s	-	Metro por segundo
TX	-	Transmissor
RX	-	Receptor
RPM	-	Rotações por minutos
V	-	Volts
mA	-	Miliamper
MHz	-	Megahertz
mm	-	Milimetro
g	-	Grama
°C	-	Grau Celsius
k Ω	-	Quiloohms
mV	-	Milivolts
%RH	-	Percentual de umidade relativa
ml	-	Mililitro
mmca	-	Milimetro de coluna de água
Hz	-	Hertz
Pa	-	Pascal

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	TRANSPORTE DE SÓLIDOS.....	13
1.2	TRANSPORTE PNEUMÁTICO	13
1.1.1	<i>Sistemas Abertos e Fechados.....</i>	13
1.2.1	<i>Pressão positiva e negativa</i>	14
1.2.2	<i>Fase diluída e fase densa</i>	14
1.2.3	<i>Escoamento laminar e turbulento</i>	15
1.3	EXPERIMENTOS SOBRE TRANSPORTE PNEUMÁTICO.....	15
1.4	AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS	16
1.4.1	<i>Dispositivos controladores programáveis.....</i>	16
1.4.2	<i>Controle e monitoramento</i>	18
1.4.3	<i>Interfaces entre operador e equipamento.....</i>	18
1.5	JUSTIFICATIVA	19
1.6	OBJETIVO	20
1.6.1	<i>Objetivo geral</i>	20
1.6.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	20
2	MATERIAIS E MÉTODOS	21
2.1	UNIDADE PILOTO DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO.....	21
2.1.1	<i>Dinâmica de fluido do transportador</i>	21
2.1.2	<i>Manômetros em U.....</i>	22
2.1.3	<i>Alimentador de sólidos</i>	24
2.2	ARQUITETURA DA AUTOMAÇÃO	25
2.3	ARDUINO MEGA 2560	26
2.3.1	<i>Recursos do Arduino Mega 2560.....</i>	27
2.3.2	<i>Pinos do Arduino Mega 2560.....</i>	27
2.4	MEDIÇÕES DA AUTOMAÇÃO	28
2.4.1	<i>Sensor MDS20N0040D-S.....</i>	28
2.4.2	<i>Conversor analógico digital HX711.....</i>	29
2.4.3	<i>Sensor DHT11.....</i>	30
2.5	FABRICAÇÃO DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO	31
2.6	CONTROLE DO ALIMENTADOR.....	31
2.7	PROGRAMAÇÃO DOS APLICATIVOS	31
2.7.1	<i>Programação do Arduino.....</i>	32
2.7.2	<i>Programação da interface.....</i>	32
2.8	GERAÇÃO DOS RELATÓRIOS	32
2.9	CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE PRESSÃO	32
2.10	CONVERSÃO DE MMCA PARA PA	34
2.11	CALCULO DE ERROS	34
2.12	VARIAÇÕES DE PRESSÃO	34
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
3.1	CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE PRESSÃO EM LABORATÓRIO	35
3.2	PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO FABRICADAS.....	36
3.3	CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE PRESSÃO NA UNIDADE PILOTO.....	36
3.3.1	<i>Comparação com outros trabalhos</i>	38
3.4	APLICATIVOS DESENVOLVIDOS	39
3.5	RELATÓRIOS GERADOS PELO APLICATIVO	40
3.6	VARIABILIDADE DE MEDIÇÃO	40
4	CONCLUSÕES	43
4.1	TRABALHOS FUTUROS	43
5	REFERÊNCIAS	44
	ANEXO I Projeto esquemático do circuito da placa de controle, contendo o Arduino Mega 2560 e seus componentes de conexão	46

<i>ANEXO II Projeto esquemático do circuito da placa de medição de pressão, contendo o sensor MDS20N0040D-S e o conversor analógico HX711</i>	<i>47</i>
<i>ANEXO III Projeto esquemático do circuito da placa dedicada a interligação da placa de controle da automação e o motor do alimentador</i>	<i>48</i>
<i>ANEXO IV Programação do Arduino para aquisição de dados dos sensores, e recebimento de comandos para o alimentador.....</i>	<i>49</i>
<i>ANEXO V Fluxograma da programação em Python da interface, geração de relatórios e envio de comandos do alimentador.....</i>	<i>50</i>
<i>ANEXO VI Exemplo de relatório gerado pela aplicação, com fins de calibração, com 30 medições válidas</i>	<i>51</i>
<i>ANEXO VII Gráficos de variabilidade de valores de pressão medidos em cada um dos sensores de pressão instalados na unidade</i>	<i>52</i>

1 INTRODUÇÃO

1.1 Transporte de sólidos

O transporte de sólidos desempenha um papel fundamental em diversos setores, como a agricultura e a indústria alimentícia, devido ao transporte de alimentos como arroz, feijão, soja, milho, entre outros grãos. Além disso, é de grande relevância no setor de mineração, relacionado ao transporte de minerais granulados (SILVA, 2021).

Dentre os sistemas de transporte amplamente utilizados, o transportador pneumático se destaca pela baixa perda de produtos durante o processo de transporte. No entanto, apresenta desafios, como o alto consumo de energia e o desgaste das suas tubulações (FIRMINO; JUNIOR; ROSA, 2021).

1.2 Transporte pneumático

Os transportadores pneumáticos operam por meio do uso de fluídos, geralmente ar, em condições dinâmicas para o transporte de sólidos, como pós ou grãos. Ao utilizar esse sistema, é fundamental considerar a granulometria, ou seja, o tamanho do sólido, que pode variar de 100 μm a 1 cm, e a densidade do material a ser transportado, que pode variar de 15 kg/m^3 a 3 t/m^3 . Além disso, deve-se observar a compatibilidade com a capacidade do próprio sistema de transporte, como o limite de velocidade de escoamento do fluído, as dimensões das seções transversais dos dutos de transporte, entre outros fatores (SANTOS, 2009).

Neste tipo de transporte, o fluído e os sólidos são transportados simultaneamente por uma linha de condução, que pode ser um tubo ou duto. O fluído é impulsionado por um ventilador, enquanto os sólidos são inseridos no sistema por meio de um alimentador (SANTOS, 2009).

1.1.1 Sistemas Abertos e Fechados

Dependendo do fluído ou material transportado, o sistema pode ser classificado como aberto ou fechado. O sistema fechado é aquele em que o fluído utilizado circula dentro de um circuito fechado, sem entrar em contato com a atmosfera. Isso é importante, pois a exposição do fluído ao ambiente pode causar problemas no transporte, como no caso de fluídos inflamáveis, riscos de contaminação do material transportado ou do ambiente, ou ainda quando a umidade do ar pode prejudicar o material a ser transportado, entre outros fatores (LOURENÇO, 2019).

Por outro lado, os sistemas abertos são empregados quando não há problemas em permitir que o fluído entre em contato com o ambiente. Nesses casos, é possível,

inclusive, utilizar o próprio ar ambiente como fluído (LOURENÇO, 2019).

1.2.1 Pressão positiva e negativa

No transporte pneumático, os ventiladores são responsáveis pela movimentação dos fluídos nas tubulações, gerando uma pressão específica no sistema. Nos sistemas de sucção, o ventilador tem a função de induzir o escoamento do ar, o que, por consequência, desloca o produto. Esses sistemas são classificados como de pressão negativa (KLEENAIR SYSTEMS, 2014). Na Figura 1 é possível ver uma ilustração deste tipo de sistema.

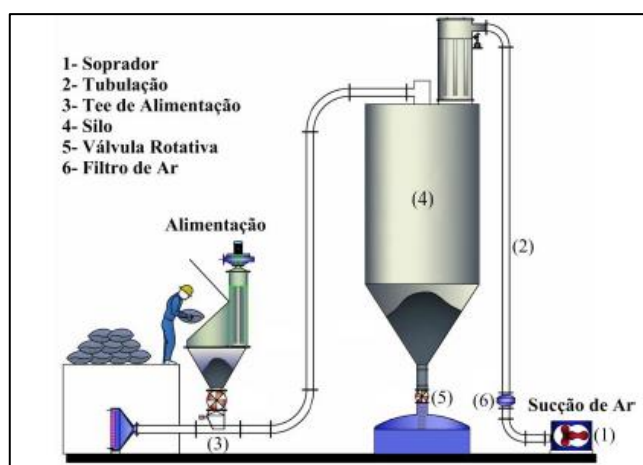


Figura 1 - Ilustração de transporte pneumático de pressão negativa. Adaptado de (KLEENAIR SYSTEMS, 2014).

Por outro lado, nos sistemas em que o ventilador tem a função de gerar um deslocamento do fluído com uma pressão superior à da tubulação, estes são considerados sistemas de pressão positiva (KLEENAIR SYSTEMS, 2014). Na Figura 2 é possível ver uma ilustração deste tipo de sistema.

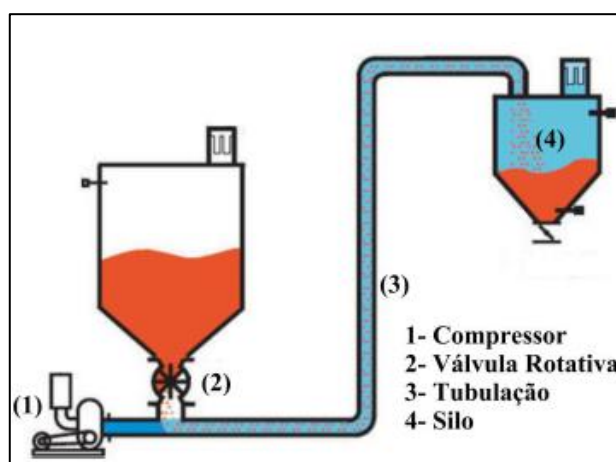


Figura 2 – Ilustração de transporte pneumático de pressão positiva (LOURENÇO, 2019).

1.2.2 Fase diluída e fase densa

O transporte pneumático tem características que podem definir este em fase diluída ou em fase densa. O transporte pneumático em fase densa é caracterizado por trabalhar com pressão maior que 100kPa, com velocidades de transporte menores que 10m/s e com concentração de sólidos maiores que 30% de volume, já a fase diluída é aquela que trabalha com pressão menor que 100kPa, com velocidades de transporte maiores que 10m/s e com concentração de sólidos menores que 1% do volume (MACAWBER ENGINEERING, INC., 2024).

A Figura 3 apresenta uma ilustração que demonstra a fase densa, caracterizada por um maior volume de grãos, o que resulta em um aumento do atrito destes nas tubulações. Por outro lado, a fase diluída é caracterizada por um menor volume de grãos, que ficam dispersos ao longo da tubulação, misturados ao fluído em condições dinâmicas (MACAWBER ENGINEERING, INC., 2024).

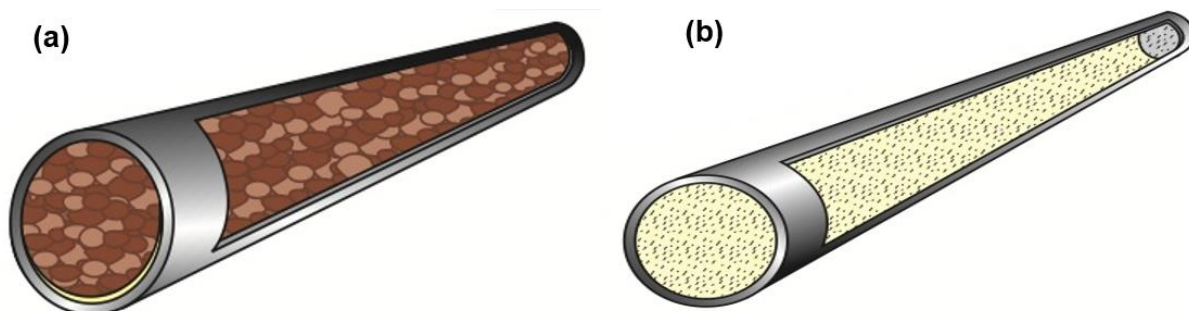


Figura 3 – Ilustração de transporte pneumático em fase densa (a) e fase diluída (b). Adaptado de (MACAWBER ENGINEERING, INC., 2024)

1.2.3 Escoamento laminar e turbulento

No transporte pneumático, o escoamento de um fluído pode ser classificado como laminar ou turbulento dependendo algumas características. No escoamento laminar, o fluído que desloca dentro de um tubo em velocidade adequada, o centro do escoamento tem maior velocidade que as áreas próximas a tubulação. Já no escoamento turbulento, o fluído se descola em velocidade elevada, gerando atrito nas superfícies da tubulação, causando a perda de carga (RIVEROS; RIVEROS-ROSAS, 2010).

1.3 Experimentos sobre transporte pneumático

Por conta de questões como friabilidade sobre os sólidos, atrasos no transporte, degradação dos tubos, ineficiência elétrica dos ventiladores e alimentadores, entre outras características, são necessários estudos e experimentos para adquirir informações sobre estas questões (SILVA, 2021).

Algumas destas questões que podem ser citadas são a velocidade adequada

para transporte de um determinado sólido em um sistema, a influência de determinadas seções do sistema no transporte dos sólidos, a comparação entre determinados sensores e atuadores para melhores medições, entre outros (SILVA, 2021).

Estes estudos muitas vezes são feitos através de testes laboratoriais sobre protótipos, sendo de grande valia a automação destes, para maior eficiência nos testes, e com as novas tecnologias, é possível a aplicação de controles mais sofisticados, acessíveis e dinâmicos (TAVARES; ROSENO, *et al.*, 2014).

1.4 Automação de processos

A evolução industrial do século XX introduziu o termo automação, criado na década de 1940, referindo-se à substituição do trabalho humano por sistemas automatizados. Com o avanço dos equipamentos mecânicos e eletrônicos, a automação atual utiliza de programação digital e controladores programáveis. Em geral a automação oferece vantagens como a substituição do ser humano em processos perigosos ou desgastantes, redução de riscos, cansaço ou queda de desempenho aos funcionários, além de otimizar o tempo das tarefas e manter a qualidade e padronização do resultado final (LAMB, 2015).

Em compensação, algumas tarefas não são automatizadas devido ao desenvolvimento tecnológico não ter alcançado tal patamar, ou pelo custo de aplicação da automação ser maior que o da mão de obra humana, além disso é necessário pensar na questão de manutenção dos equipamentos utilizados na automação, seu custo e conhecimento de uso pelos funcionários. Para estes casos, o uso de mão de obra humana pode ser uma melhor opção pela empresa (LAMB, 2015).

1.4.1 Dispositivos controladores programáveis

Dentre os dispositivos controladores em automação de processos, podem ser citados o CLP, sigla de controlador lógico programável, que são controladores projetados para uso industrial, estes têm proteção contra ruído elétricos, vibrações, entre outras influências externas. Diferente dos computadores, não há necessidade de um monitor, além de terem inúmeras entradas e saídas, permitindo conexão com diversos dispositivos (LAMB, 2015). Na Figura 4 pode ser visto o CLP SIMATIC S7-1200, da fabricante SIEMENS.



Figura 4 - CLP SIMATIC S7-1200 (SIEMENS, 2023)

Outros dispositivos que pode ser usado como computador, e assim como controlador, é o Raspberry Pi. Este foi desenvolvido para fins de criar computador mais acessíveis, tendo os mesmos *hardwares* de um computador, como UPC, memória RAM, entre outros, mas em tamanho e recursos menores, podendo se desejado instalar um sistema operacional, inserir periféricos como mouse, teclado e monitor, entre outros (RASPBERRY PI TRADING LTD., 2023). Na Figura 5 pode ser visto o Raspberry Pi.



Figura 5 - Raspberry Pi 4 model B (RASPBERRY PI TRADING LTD., 2023)

Um exemplo de automação com o uso do Raspberry Pi há por exemplo a aplicação de automação residencial com uso de IoT, ou Internet das Coisas, tecnologia que visa a conectividade de diversos dispositivos com o uso da internet, de forma a ter um maior controle dos dispositivos, como por exemplo geladeira, cafeteira, portão de garagem, dispositivos de ar condicionado, entre outros (KHAIRNAR; BANSODE, *et al.*, 2021).

Um controlador mais acessível e para diversas aplicações são os modelos da plataforma Arduino. Esta plataforma de microcontrolador que pode ser programado facilmente em um computador através de um cabo USB (*Universal Serial Bus* ou barramento serial universal), com a função de trabalhar com sinais de entrada e saída

através do circuito eletrônico da plataforma, podendo estas entradas serem sensores, botões, entre outros, e as saídas motores, atuadores, e outros (MONK, 2013). Na Figura 6 é possível ver o Arduino UNO R3.



Figura 6 - Arduino UNO R3 (ARDUINO, 2023)

Um exemplo de automação com Arduino pode ser visto em uma automação de irrigação de uma plantação de alface, que com o uso do Arduino reduziu em aproximadamente 30% o custo do controle, além de proporcional normalmente a captação de dados com sensores instalados (PEREIRA, 2021).

Outro exemplo é o controle de um modelo de braço eletromecânico, focado na separação de materiais por suas cores, demonstrando seu uso junto a dispositivos mecânicos executando funções mais elaboradas em protótipos (SILVA; KOGA; PINHEIRO, 2022).

1.4.2 Controle e monitoramento

Em sistemas de automação, sensores são empregados para o monitoramento de variáveis, enquanto atuadores são utilizados para o controle dessas variáveis (LAMB, 2015).

Um exemplo desse conceito foi o desenvolvimento de uma automação para o aproveitamento de água da chuva, utilizando um Arduino. Nesse sistema, sensores de umidade foram usados para medir os níveis de umidade, e, com base nesses dados e na programação desenvolvida, foi possível controlar uma bomba d'água, mantendo a umidade dentro de um valor desejado (JESUS; MARCO, *et al.*, 2024).

Outro exemplo foi a automação criada para a eletrificação de baterias acústicas, também desenvolvida com Arduino e sensores piezoelétricos. Os sensores piezoelétricos captam as vibrações geradas pela bateria e as convertem, por meio do sistema e da programação, em sons digitais (COSTA; OLIVEIRA, *et al.*, 2024).

1.4.3 Interfaces entre operador e equipamento

Em prol da interação dos operadores com os equipamentos da automação, são desenvolvidas aplicações lógicas de forma a gerar esta interação, que naturalmente necessitam de periféricos como telas, teclados, *mouses* ou *touchscreens* para esta interação (LAMB, 2015).

Existem dois tipos principais de interfaces: as interfaces de texto, que fornecem dados em formato textual e permitem a inserção de instruções por meio de comandos escritos aos equipamentos, e as interfaces gráficas, comumente utilizadas em CLPs, que combinam textos e imagens, sejam coloridas ou monocromáticas, permitindo a visualização gráfica dos dados, botões de comando e outros elementos interativos (LAMB, 2015).

Entre essas interfaces, a Figura 7 mostra a interface Automation, um sistema de automação residencial desenvolvido para dispositivos móveis utilizando Arduino (ARGENTA; FRANCISCO, *et al.*, 2020), e a Figura 8 apresenta a IHM Mercurio, voltada para sistemas embarcados em geral, permitindo a configuração de diversos dispositivos (SILOTTI; IAIONE; MINAKAWA, 2022).



Figura 7 – Interface para Sistema de Automação Residencial para celulares (ARGENTA; FRANCISCO, *et al.*, 2020)

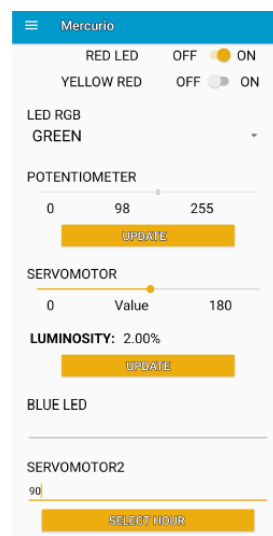


Figura 8 – IHM Mercurio (SILOTTI; IAIONE; MINAKAWA, 2022)

1.5 Justificativa

Na ausência de uma automação, erros e desgastes humanos estão sujeitos a ocorrer durante os experimentos, o que pode resultar na obtenção de dados incorretos, além de aumentar o tempo necessário para a realização dos experimentos, o número de indivíduos envolvidos e outros fatores.

Com a implementação deste tipo de automação, é possível contribuir com

experimentos mais eficientemente, e com dados mais confiáveis, pois estes problemas poderão ser reduzidos.

Esta automação sendo feita de forma digital e com recursos de fácil acesso, é possível implementar recursos de menor custo, dinâmicos, mantendo a confiabilidade dos dados adquiridos, além de fornecer uma variedade de implementações futuras, com o avanço das novas tecnologias.

1.6 Objetivo

1.6.1 Objetivo geral

O presente trabalho teve por objetivo desenvolver um sistema automatizado para monitoramento e controle, voltado para protótipos de experimentos laboratoriais de transporte pneumático de grãos, utilizando ar em condição dinâmica para o transporte.

1.6.2 Objetivos específicos

Visando alcançar o objetivo geral do trabalho, teve-se como objetivos específicos:

- 1) Implementar este sistema automatizado na Unidade Piloto de Transporte Pneumático da Universidade Santa Cecília, como forma de validação.
- 2) Desenvolvimento deste sistema automatizado com o uso do Arduino, com sensores e controladores compatíveis para desenvolver os experimentos;
- 3) Controlar o alimentador de grãos da Unidade Piloto que será implementada;
- 4) Aferir a pressão em alguns pontos no decorrer da linha de transporte da Unidade Piloto;
- 5) Medir a umidade do ar nos pontos de entrada e saída do transporte;
- 6) Gerar relatórios digitalizados da pressão e umidade medida ao longo da linha de transporte;

2 MATERIAIS E MÉTODOS

De forma a validar este projeto, esta automação foi implementada em uma unidade piloto de transporte pneumático, do laboratório de Operações Unitárias, da Universidade Santa Cecília.

2.1 Unidade piloto de transporte pneumático

Para estudo experimental, o laboratório de operações unitárias da Universidade Santa Cecília em Santos – SP desenvolveu uma unidade piloto para transporte pneumático, utilizando ar como fluído de transporte, com alimentação indireta, sendo um sistema aberto que atua com pressão positiva, podendo operar na fase diluída, conforme Figura 9.

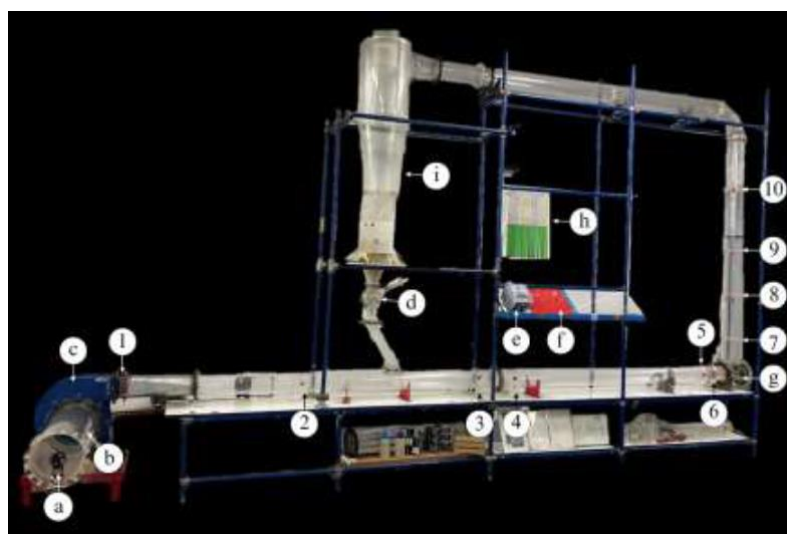


Figura 9 – Unidade piloto de transportador pneumático em fase diluída, construído no laboratório de operações unitárias da Universidade Santa Cecília. Itens: 1) a 10) Pontos de tomadas de pressão dos tubos do manômetro em “U”; a) Tubulação de entrada do ar de alimentação com anemômetro; b) Duto de sucção do ventilador de 223 mm de diâmetro interno e comprimento de 610 mm; c) Ventilador centrífugo de 228 mm de diâmetro com motor de 3hp e 2,9 A; d) Silo com válvula rotativa; e) Inversor de frequência do motor do ventilador; f) controlador de velocidade da válvula rotativa; g) Tê saída de lado; h) Banco de tubos em “U” para medida de pressão estática; i) Ciclone (MESSIAS; BERTELLI, et al., 2024)

2.1.1 Dinâmica de fluído do transportador

Esta unidade utiliza o próprio ar do ambiente para a dinâmica de fluído no transporte pneumático. Com um tubo de acrílico de 228 mm de diâmetro interno, é feito o escoamento forçado de ar através de um ventilador centrífugo, que atua através de um mecanismo ligado ao eixo de um motor WEG W22 Plus (WEG, 2020). O mecanismo de pode ser visto nas Figura 10 e Figura 11.

O motor é controlado por um inversor de frequência WEG CFW08 Plus A1, modelo CFW080040S2024POA1Z (WEG, 2009) configurando a frequência, e consequentemente velocidade do fluído, pelo usuário da unidade piloto. Para verificação da velocidade do fluído na entrada deste sistema, é utilizado um

anemômetro da PROVA Instruments Inc., modelo AVM-01 (PROVA INSTRUMENTS INC.).



Figura 10 – Mecanismo de ventilação da Unidade Piloto (AUTOR, 2022)

O ventilador tem hélices do tipo siroco, para uso em alta vazão de fluído, e baixa ou média pressão, considerado pela fabricante ideal para o processo (VENTBRAS). Foi instalado para proteção da correia entre o motor e o ventilador uma peça protetora em acrílico, impedindo contato intencional de usuários ou queda de objetos.



Figura 11 - Mecanismo de ventilação da Unidade Piloto visto de lado (AUTOR,2023)

Na saída do ventilador há um duto adaptador com retificador de ar interno, adaptando a saída quadrada do ventilador para o formato circular da tubulação, e reduzindo a turbulência do ar em condição dinâmica (ZANETTE; MONTEIRO, *et al.*, 2010).

2.1.2 Manômetros em U

A Unidade Piloto foi desenvolvida para fazer a medição de pressão em determinados pontos da tubulação, estes denominados anéis piezométricos (ZANETTE; MONTEIRO, *et al.*, 2010), que atualmente totalizam dez ao decorrer da tubulação, conforme pode ser vista sua localização na Figura 12.

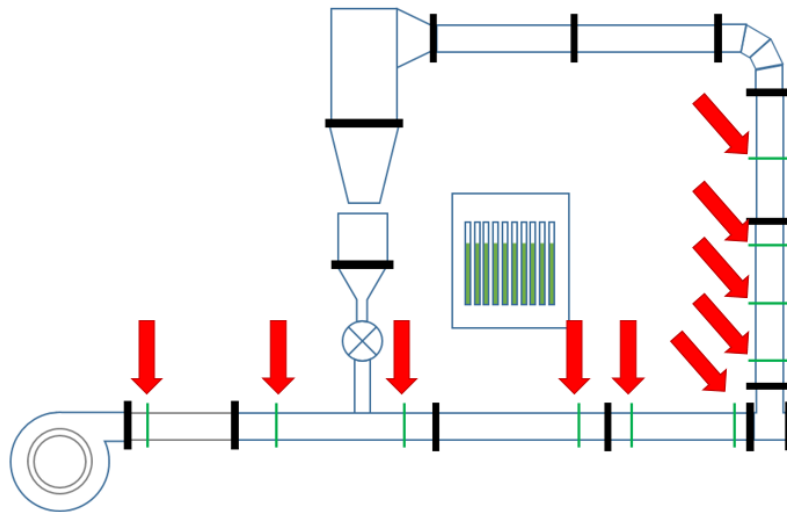


Figura 12 – Localização dos anéis piezométricos a serem automatizados, em uma ilustração da unidade piloto (AUTOR, 2024)

A medição é feita através de manômetros em U, desenvolvidos pelo próprio Núcleo de Operações Unitárias, que utilizam água com corante verde para facilitar a visualização para medição, sendo um para cada anel piezométrico, podendo um exemplo deste ser visto na Figura 13,

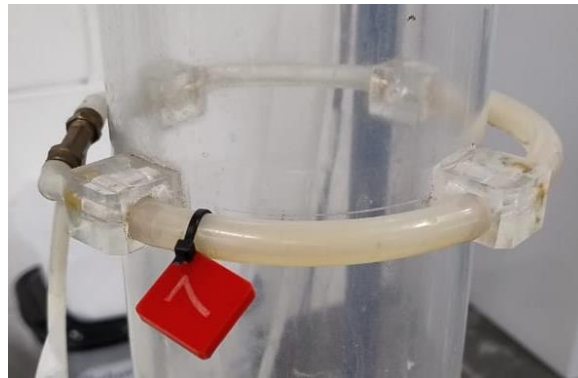


Figura 13 – Anel piezométrico do ponto 7 (AUTOR, 2024)

Da mesma forma que as medições de velocidade do ar, a medição por estes manômetros também tende a ter a influência de erros humanos na leitura do manômetro, uma vez que há variação da altura do líquido durante o processo de experimento.



Figura 14 - Manômetro em U vista frente com água e corante verde da Unidade Piloto (AUTOR, 2022)

2.1.3 Alimentador de sólidos

O alimentador é composto por um silo, uma válvula rotativa, o duto de saída do alimentador e um controlador de velocidade desta alimentação, mostrados na Figura 15.



Figura 15 - Alimentador de grãos da Unidade Piloto (AUTOR, 2022)

A rotação desta válvula é feita através de uma caixa de redução com proporção de 1/7, impulsionada por um motor de corrente contínua, com rotação máxima de 400 RPM, que pode ser visto na Figura 16. Com esta proporção da caixa de redução e a rotação máxima do motor, entende-se que a válvula pode rotacionar no máximo a aproximadamente 57 RPM.



Figura 16 - Motor do alimentador da Unidade Piloto (AUTOR, 2022)

A velocidade de rotação desta válvula é controlada externamente por um dispositivo, visto na Figura 17, que tem internamente um circuito de potência, com transformadores, fusíveis e outros componentes, e um potenciômetro ligado a parte externa em um mecanismo de acrílico, para movimento circular do ajuste de velocidade.



Figura 17 - Controlador de velocidade do alimentador da Unidade Piloto (AUTOR, 2022)

2.2 Arquitetura da automação

Foram utilizados 10 sensores de pressão ligados aos anéis piezométricos, que estavam conectados aos manômetros em U, sensores de umidade foram instalados na entrada e saída de ar da unidade piloto, e o controle do alimentador de grãos foi instalado juntamente ao motor, para controle de velocidade. Na Figura 18 pode ser vista uma ilustração mostrando a arquitetura de eletrônicos da automação.

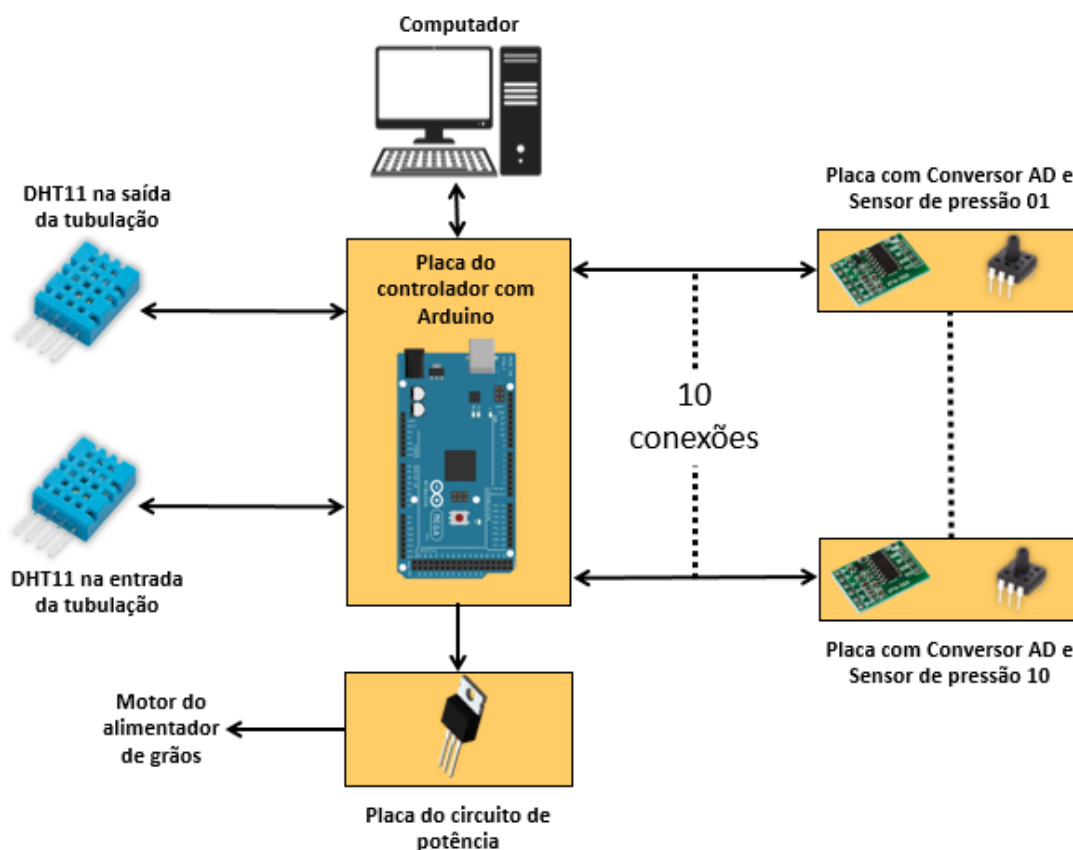


Figura 18 – Ilustração da arquitetura de componentes da automação desenvolvida (AUTOR, 2024)

Para visualização dos dados adquiridos, controle de velocidade do motor e aquisição de relatórios digitais, foi utilizado um computador com o aplicativo dedicado a automação.

2.3 Arduino Mega 2560

Para o controle automatizado foi adotado o dispositivo Arduino Mega 2560, por ser o modelo que melhor se adequa ao projeto devido sua quantidade de pinos disponíveis, além de fornecer recursos para controle de atuadores, entradas analógicas e outros.

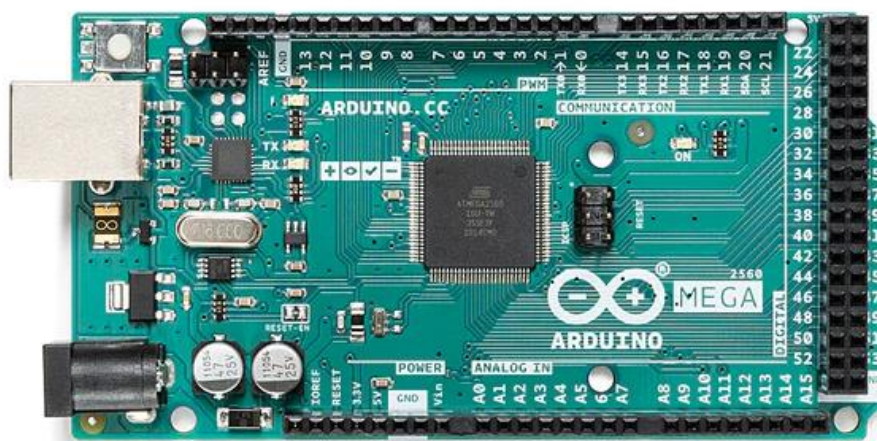


Figura 19 - Arduino Mega 2560 (ARDUINO).

2.3.1 Recursos do Arduino Mega 2560

O Arduino Mega 2560 é a plataforma do microcontrolador Atmega2560, possuindo pinos digitais para entrada e/ou saída, pinos analógicos de entrada, recurso de PWM (*Pulse Width Modulation* ou modulação por largura de pulso), entre outros (ARDUINO). A Tabela 1 mostra alguns recursos deste modelo de Arduino.

Tabela 1 – Recursos do Arduino Mega 2560 (ARDUINO)

Tensão de operação	5V
Alcance recomendado de tensão de alimentação	7V à 12V
Corrente máxima dos pinos digitais	20mA
Quantidade de pinos digitais (entrada e saída)	54
Quantidade de pinos digitais com recurso PWM	15
Quantidade de pinos analógicos (entrada)	16
Frequência de trabalho	16MHz
Dimensão (Comprimento x Largura)	101,52 x 53,3mm
Peso	37g

Conforme a Figura 19, é possível ver que o Arduino Mega 2560 possui pinos com suas nomenclaturas já escritas na placa, além de ter um conector USB, um conector jack de alimentação elétrica, um botão tátil, e outros (ARDUINO).

O conector USB tem como função a conexão com um computador para fazer sua programação, comunicação serial, além de ter a possibilidade de fornecer alimentação de 5V. O Jack de alimentação elétrica permite a alimentação conforme alcance recomendado de 7V à 12V. O botão tátil tem a função de reiniciar o funcionamento da programação do Arduino (MONK, 2013).

2.3.2 Pinos do Arduino Mega 2560

Os pinos digitais, nomeados como 0 até 53, podem receber (entrada) sinais de 0V ou 5V, e enviam (saída) sinais de 0V ou 5V com no máximo 20mA, a forma de trabalho (entrada ou saída) varia conforme a configuração da programação (ARDUINO).

Os pinos analógicos, nomeados como A0 até A15, podem receber de 0V até 5V, trabalhando com um conversor analógico digital de 10bits, convertendo o sinal elétrico para um valor digital inteiro de 0 até 1023 (ARDUINO).

Este Arduino tem 4 portas de comunicação serial, sendo 2 pinos para cada porta, em que um pino é para transmissão, nomeado TX, e um para recepção, nomeado RX (ARDUINO). A Tabela 2 mostra quais são os pinos de cada porta e suas funções.

Os pinos digitais 2 ao 13 e o 44 ao 46, totalizando 15 pinos, possuem recurso PWM que trabalham com um sinal de 8bits, sendo controlados por valores digitais inteiros de 0 a 255 (ARDUINO). Este recurso permite o controle digital de dispositivos, trabalhando em nível lógico alto e baixo, alterando o tempo de cada nível lógico conforme o valor digital inteiro definido (CITYSYSTEMS, 2016).

Tabela 2 – Portas de comunicação serial e seus pinos no Arduino Mega 2560

Porta serial	Função	Nomenclatura	Pino Digital
Porta Serial 0	Recepção	RX0	0
	Transmissão	TX0	1
Porta Serial 1	Recepção	RX1	19
	Transmissão	TX1	18
Porta Serial 2	Recepção	RX2	17
	Transmissão	TX2	16
Porta Serial 3	Recepção	RX3	15
	Transmissão	TX3	14

2.4 Medições da automação

Foi planejado fazer a medição de umidade na entrada e saída da tubulação e a pressão do ar nos 10 pontos através dos anéis piezométricos.

2.4.1 Sensor MDS20N0040D-S

O sensor de pressão utilizado foi o MDS20N0040D-S, que faz a medição da pressão através da variação de uma resistência. Adota de tecnologia MEMS, ou tecnologia de sistemas microeletromecânicos (INTEGRATED SENSING SYSTEMS, INC.), trabalhando com uma ponte de resistores, este sensor é considerado de baixo custo e de alta confiança.



Figura 20 - Sensor MDS20N0040D-S (E-RADIONICA)

O sensor pode ser utilizado para medição da pressão de pneus de automóveis, bombas de ar, monitoramento de pressão sanguínea, instrumentação hospitalar e outros. Este pode ser visto na Figura 20 e algumas características podem ser vistas na Tabela 3.

Tabela 3 - Características do sensor de pressão MDS20N0040D-S (E-RADIONICA)

Medição de pressão	0 à 40kPa
Temperatura de operação	-40°C à 85°C
Valor ohmico de cada resistência	4 kΩ à 6kΩ
Tensão de operação	5V
Tensão de saída	50 à 100mV
Linearidade	±0,3% F.S.
Histerese	±0,7% F.S.

Como a variação da resistência é muito pequena, dependendo da pressão aplicada, a tensão de saída deste sensor é dada em milivolts (mV) (E-RADIONICA). Desta forma, foi necessário para o uso com Arduino, o uso de um conversor, sendo utilizado o componente HX711.

2.4.2 Conversor analógico digital HX711

Para a leitura do sensor MDS20N0040D-S, foi utilizado o conversor analógico digital HX711, destinado para aplicações com sensores que utilizem ponte de resistores. Algumas características podem ser vistas na Tabela 4.

Tabela 4 - Características do conversor analógico digital HX711 (AVIA SEMICONDUCTOR)

Quantidade de bits	24bits
Tensão de operação	2,7V à 5,5V
Temperatura de operação	-40°C à 85°C

Por questões de confiabilidade foi utilizado o módulo deste conversor, uma vez que este também suporta os 5V fornecidos pelo Arduino, sendo um para cada sensor.

2.4.3 Sensor DHT11

Antes do desenvolvimento deste trabalho, não havia sensores para a medição de umidade relativa na unidade piloto de transporte pneumático, para isso foi utilizado o sensor digital DHT11.

A medição de umidade é feita através de um componente resistivo para sensoramento, sendo sua medição é transmitida de forma serial por um microcontrolador interno de 8 bits (GUANGZHOU AOSONG ELECTRONICS CO., LTD., 2022).

Conforme a Figura 21, o sensor DHT11 apesar de ter quatro pinos de conexão, apenas três são utilizados, o terceiro pino não tem conexão interna. O primeiro pino é a conexão do polo positivo da tensão de alimentação, o segundo pino é a conexão de dados serial e o quarto pino é o polo negativo da tensão de alimentação (GUANGZHOU AOSONG ELECTRONICS CO., LTD., 2022).

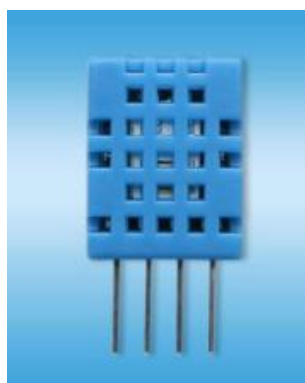


Figura 21 - Sensor DHT11 (GUANGZHOU AOSONG ELECTRONICS CO., LTD., 2022)

Na Tabela 5 pode ser vista algumas das suas características, como precisão em %RH (*Relative Humidity*) e outros (GUANGZHOU AOSONG ELECTRONICS CO., LTD., 2022).

Tabela 5 - Características do sensor de umidade DHT11 (GUANGZHOU AOSONG ELECTRONICS CO., LTD., 2022)

Alcance de medição	5%RH à 95%RH
Precisão à 25°C	±5%RH
Repetitividade	±1%RH
Histerese	±0,3%RH
Tempo de resposta	<6s
Tensão de operação	3,5V à 5,5V

Foram instalados 2 sensores DHT11, sendo um na parte interna da entrada de

ar da tubulação e outro na saída, possibilitando assim a medição de umidade relativa.

2.5 Fabricação das placas de circuito impresso

Foram desenvolvidos 3 projetos de placa de circuito impresso, sendo um para o controle da automação (ANEXO I), contendo o Arduino Mega 2560 e seus componentes para conexão, um segundo para acoplamento do sensor de pressão MDS20N0040D-S e seu conversor AD HX711 (ANEXO II), e por fim um circuito dedicado para interligação da placa de controle e do alimentador (ANEXO III).

Apenas a placa referente a medição de pressão foi replicada 10 vezes, uma para cada anel piezométrico, já a placa de controle da automação e placa dedicada ao alimentador foram fabricadas apenas uma de cada.

Os projetos de circuito foram desenvolvidos no aplicativo KiCad, em que foi feito o esquemático e os *layouts PCB* das placas a serem fabricadas. (KICAD, 2024). Após o desenvolvimento do projeto, foi utilizada uma prototipadora TTP PCB-Proto 1S para fabricação da placa do projeto sobre uma placa de fenolite (TTP INDÚSTRIA MECÂNICA). Após estas fabricações, foram feitas as soldas dos componentes, programações e testes.

2.6 Controle do alimentador

Para o controle do alimentador, foi utilizada uma placa dedicada para interligação do motor do alimentador e do Arduino (anexo III). Nesta placa ficou instalado o circuito de potência utilizando o transistor TIP122 para controle do motor do alimentador, suportando as configurações de tensão e corrente (ON SEMICONDUCTOR, 2014).

Para separação do circuito de potência do circuito de controle com Arduino, dando maior segurança elétrica ao controlador, foi utilizado um optoacoplador 4N25, que separa o acionamento elétrico através de um LED interno e um sensor óptico. Este optoacoplador necessita de uma resistência em seu LED interno, por conta da tensão do Arduino ser de 5V (VISHAY SEMICONDUCTOR, 2010).

O controle do motor foi feito através de sinais PWM gerados pelo Arduino, de forma a controlar a velocidade do motor.

2.7 Programação dos aplicativos

A programação de um controlador tem como base a sua linguagem de programação, esta é definida pelo Python.Land como um vocabulário e conjunto de regras gramaticais para instruir um computador a desempenhar uma tarefa (PYTHON.LAND, 2023).

Com a programação escrita em uma determinada linguagem, tendo um padrão

lógico a ser seguido, e com o uso de um software chamado IDE (*Integrated Development Enviroment*, ou ambiente de desenvolvimento integrado), é possível copiar a programação para um controlador executar suas tarefas (SÖDERBY, 2023).

2.7.1 Programação do Arduino

A programação de um Arduino, por padrão, é feita através da sua IDE própria, encontrada no site oficial do Arduino e programada através de vários comandos próprios deste, que tem como base as linguagens de programação Wiring e C (ARDUINO, 2023).

O Arduino sendo o controlador da automação desenvolvida, tem em sua programação a medição dos dados de pressão e umidades dos pontos definidos e posteriormente a comunicação com um computador (ANEXO IV).

2.7.2 Programação da interface

A *interface* que fica em execução no computador foi desenvolvida em linguagem Python, escolhida por ser uma linguagem muito utilizada na atualidade, com a intenção de dispor dos dados de forma organizada e facilitando a interação do usuário com a automação (ANEXO V).

A *interface* é gráfica, mostrando a pressão e umidade medidas constantemente, podendo ser alterado as pressões entre mmca ou Pa, um cursor e botão para configuração do PWM enviado ao alimentador e a geração de relatórios digitais.

2.8 Geração dos relatórios

Os relatórios são gerados pelo aplicativo em linguagem Python desenvolvido para computador, podendo gerar relatórios de pressão e umidade, e relatórios para novas calibrações.

Os relatórios de pressão e umidade podem ser fornecidos nas unidades de pressão mmca ou Pa, e na unidade de umidade %RH. Os relatórios para calibração fornecem os valores adquiridos pelos sensores de pressão, na escala de 24bits do HX711, não fornecendo valores de umidade neste caso. Estes foram desenvolvidos no formato XLSX pela habitualidade deste formato para planilhas.

2.9 Calibração dos sensores de pressão

Foram feitos testes de calibração do sensor de pressão, para se ter conhecimento dos valores medidos pelo sensor em relação a um dispositivo referencial de medição de pressão.

Para isto foi utilizado um manômetro em U, para medição de pressão como referência, um êmbolo de 20ml para aplicação de pressão, o sensor MDS20N0040D-

S em conjunto ao conversor analógico digital HX711, e uma conexão em Y plástica para interligação junto a tubos de silicone de toda a unidade piloto, conforme a Cap System (CAP SYSTEM, 2020).

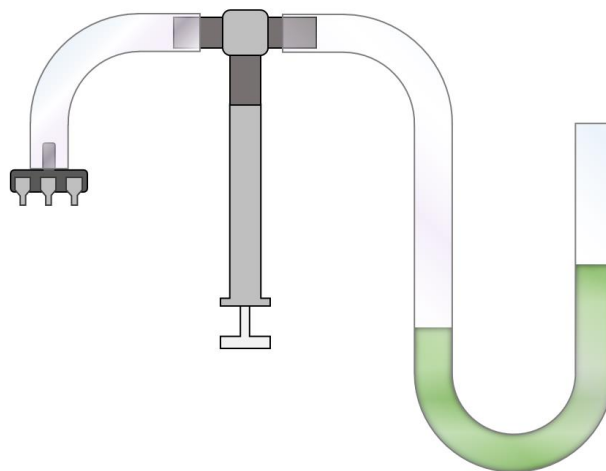


Figura 22 - Ilustração do sistema de calibração utilizando a conexão Y, êmbolo e um manômetro em U como referência (AUTOR,2023)

Esta calibração permite a aquisição de dados que posteriormente foram utilizados para aquisição da equação da reta de cada sensor, considerando o retorno do conversor analógico digital HX711 e comparando com os dados de pressão, é possível calcular as constantes lineares e angulares de cada sensor, tendo a pressão atmosférica, ou 0 mmca (milímetros de coluna de água) no manômetro em U, como referência. Foram feitos testes a cada 10 mmca, numa faixa de até 50 mmca. Além disso, foi possível calcular o quadrado do coeficiente de correlação de Pearson, com a intenção de validar as medidas adquiridas (DARTMOUTH).

A mesma calibração posteriormente foi feita diretamente na unidade piloto, com os sensores de pressão instalados, utilizando apenas ar em condição dinâmica e o recurso de geração de relatórios digitais.

Para padronizar a calibração dos sensores de pressão na unidade piloto, foi utilizada 12 frequências do inversor de frequência diferentes do ar dentro da tubulação, inicialmente com o ventilador parado, ou seja, o inversor de frequência em 0Hz (zero Hertz), e em seguida ajustando o inversor de frequência de 10Hz à 40Hz, com passos de 3 Hertz.

Utilizando o anemômetro para fazer as medições de ar nestes passos, e devido as variações, foi feita a medição por 60 segundos e então a média aritmética dos valores máximos e mínimos encontrados.

O relatório foi gerado com 60 medições para cada sensor, em um total de 12

velocidades diferentes, sendo um total de 12 relatórios para cada sensor, em que o primeiro relatório a velocidade do ar é zero, sendo a referência das medições. Assim foi possível mensurar uma média do valor adquirido para cada sensor, para então obter as equações lineares de cada sensor na unidade piloto.

2.10 Conversão de mmca para Pa

A conversão de mmca para Pa (Pascal) foi feita através da conversão do Instituto de Pesos e Medidas do Estado de São Paulo, em que considera a pressão atmosférica a nível do mar como 1 atm (FAMABRAS, 2013). Considerando que os testes foram feitos na cidade de Santos, São Paulo, que é litorânea, então o valor em Pa de 1 atm é dado pelo Instituto por 101.325 Pa, valor referencial semelhante ao 0 mmca do manômetro em U.

Assim, para conversão dos dados em mmca para Pa, é possível então aplicar a conversão vista na equação 1, em que “ p_{Pa} ” é a pressão absoluta em Pa a ser encontrada, “101325” é a pressão atmosférica referencial em Pa, “ p_{mmca} ” é a pressão medida em mmca, e “9,81” é a constante do produto da densidade da água e da aceleração da gravidade (GOUVEIA, 2020).

$$p_{Pa} = 101325 + (p_{mmca} * 9,81) \quad (1)$$

2.11 Cálculo de erros

Após a calibração dos sensores de pressão na Unidade Piloto, foram feitos os cálculos de erro percentual (E) e média percentual absoluta de erro (MAPE) de cada sensor, conforme equações (2) e (3), respectivamente, sendo “ med_{aut} ” as medições fornecidas pela automação, “ med_{man} ” as medições do manômetro em U de referência, e “n” a quantidade de ensaios, desconsiderando o primeiro ensaio devido o valor da pressão diferencial ser zero (PENTEADO, 2021).

$$E = \frac{med_{aut} - med_{man}}{med_{man}} * 100\% \quad (2)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|med_{aut} - med_{man}|}{med_{man}} * 100\% \quad (3)$$

2.12 Variações de pressão

Foi feita a análise de variações de pressão no decorrer da tubulação, através do recurso de geração de relatórios digitais, mostrando a capacidade da automação de adquirir dados que possam estar relacionados com o regime de escoamento do fluido.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Calibração dos sensores de pressão em laboratório

Fazendo a calibração de cada sensor individualmente, foi possível adquirir a equação de cada um, e o quadrado do coeficiente de correlação de Pearson dado por R^2 , que seguem na Tabela 6, sendo “x” o valor adquirido pelo sensor e “y” o valor de pressão diferencial em mmca.

Tabela 6 – Equações adquiridas pela calibração individual dos sensores, para mmca(AUTOR,2023)

Nº do sensor	Equação adquirida pela calibração individual	R^2
1	$y = 1,412 * 10^{-3}x + 91.556,429$	0,989
2	$y = 1,466 * 10^{-3}x + 91.891,586$	0,972
3	$y = 1,237 * 10^{-3}x + 92.911,446$	0,994
4	$y = 1,299 * 10^{-3}x + 92.243,688$	0,975
5	$y = 1,231 * 10^{-3}x + 92.712,765$	0,994
6	$y = 1,782 * 10^{-3}x + 88.980,347$	0,996
7	$y = 1,122 * 10^{-3}x + 94.241,753$	0,973
8	$y = 1,383 * 10^{-3}x + 91.958,355$	0,981
9	$y = 1,573 * 10^{-3}x + 90.379,212$	0,992
10	$y = 1,685 * 10^{-3}x + 77.354,234$	0,996

A Tabela 7 mostra os erros percentuais adquiridos com base nas equações, em comparação ao manômetro de referência, em milímetros de coluna de água. Sendo a medição inicial de 0mmca, não há erro para este caso.

Tabela 7 - Erro percentual da medição de calibração dos sensores de pressão (AUTOR, 2024)

Medição do manômetro referencial (mmca)		10	20	30	40	50
Erro percentual de cada sensor	1	1,36%	14,47%	-4,18%	-0,88%	-8,03%
	2	-30,12%	21,28%	25,20%	1,54%	4,08%
	3	-0,11%	-3,61%	7,80%	-5,08%	2,01%
	4	35,15%	-0,26%	-7,13%	-7,02%	-9,52%
	5	25,56%	-5,37%	-3,24%	-3,11%	-7,50%
	6	2,59%	-6,26%	-2,17%	0,19%	6,60%
	7	-32,04%	16,71%	22,46%	3,73%	12,24%
	8	-36,05%	-8,66%	17,68%	32,02%	36,19%
	9	-18,63%	7,78%	-0,43%	13,28%	4,59%
	10	16,92%	3,99%	-6,07%	-4,31%	-6,84%

Nestes testes, é possível notar que os dados adquiridos para cada um dos sensores tiveram o coeficiente de correlação de Pearson ao quadrado próximos de 1,0, demonstrando boa proximidade com os valores referenciais.

Apesar disso, os percentuais de erro demonstraram que para pressões mais

baixas, o sistema desenvolvido tem erros maiores em comparação a pressões maiores.

3.2 Placas de circuito impresso fabricadas

As placas desenvolvidas, de controle da automação, dos sensores de pressão e da interligação do controle com o motor do alimentador, tiveram a capacidade de acoplamento dos componentes eletrônicos do trabalho, sanando suas funções quanto a automação.

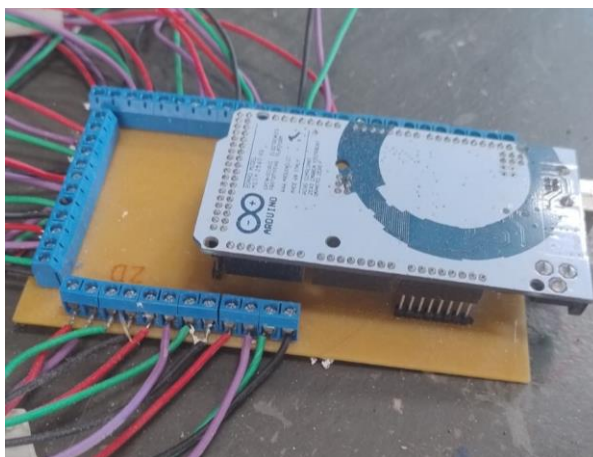


Figura 23 - Placa de controle da automação, com o Arduino e seus componentes de conexão (AUTOR, 2023)

A placa de controle foi desenvolvida de forma a ter componentes para conexões com todos os componentes externos, enquanto a conexão com o computador é feita pelo próprio Arduino, podendo esta ser vista na Figura 23.

A placa de controle gerou conexão entre a placa de controle e o motor do alimentador, sendo necessário no transistor TIP122 a instalação de um dissipador térmico com pasta térmica, devido a corrente elétrica utilizada pelo motor.

Após a fabricação das placas, foi feita a calibração diretamente na unidade piloto utilizando as placas desenvolvidas com seus devidos componentes conectados.

3.3 Calibração dos sensores de pressão na unidade piloto

Após ser feita a instalação da automação na unidade piloto, foi feita a padronização das velocidades de ar, utilizando um anemômetro para isto.

Tabela 8 - Velocidades medidas com anemômetro na entrada de ar da unidade piloto, e sua média calculada. (AUTOR, 2023)

Valor do inversor de frequência (Hz)	Velocidade mínima na entrada (m/s)	Velocidade máxima na entrada (m/s)	Média das velocidades na entrada (m/s)
0	0	0	0
10	1,2	2	1,6
13	1,8	2,3	2,05
16	2,4	2,8	2,6
19	2,9	3,3	3,1
22	3,3	4	3,65
25	3,8	4,5	4,15
28	4,3	5	4,65
31	5,5	4,9	5,2
34	5,4	6	5,7
37	5,7	6,6	6,15
40	6,2	6,8	6,5

Estabelecido o padrão de velocidade, foi possível adquirir as medições, obtendo os dados de erro percentual para cada medição em relação ao manômetro em U, em diferentes velocidades do fluido em condição dinâmica na tubulação, e o erro médio absoluto de cada sensor, visto respectivamente em Tabela 9 e Figura 24.

Tabela 9 – Erro percentual de cada sensor instalado na unidade piloto, em relação ao manômetro em U de referência (AUTOR, 2023)

Velocidade média do ar na entrada (m/s)	Anel piezométrico com sensor instalado e seus respectivos erros percentuais									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1,60	-35%	-7%	-15%	1%	-82%	-76%	-295%	-109%	-103%	-73%
2,05	-22%	-17%	-12%	-18%	6%	11%	-9%	-36%	-34%	-25%
2,60	-19%	-16%	-5%	-6%	2%	0%	-13%	13%	-14%	2%
3,10	2%	-6%	-8%	12%	2%	-3%	-10%	-11%	-4%	-10%
3,65	17%	1%	-10%	-2%	-1%	1%	-2%	-9%	2%	14%
4,15	4%	2%	5%	-1%	-1%	-4%	3%	12%	11%	11%
4,65	0%	3%	1%	-2%	-3%	-5%	21%	15%	15%	8%
5,20	9%	10%	7%	3%	4%	0%	4%	11%	10%	2%
5,70	10%	14%	16%	11%	16%	17%	28%	20%	22%	18%
6,15	5%	0%	6%	-1%	8%	10%	10%	1%	5%	4%
6,50	6%	6%	7%	-2%	7%	9%	18%	11%	14%	4%

Foi possível notar que em velocidades de fluido mais baixas, que tem menores pressões, a diferença de medição da pressão em relação a referência foi percentualmente maior, sendo menor e mais estável em velocidades de fluido acima de 1,6m/s.

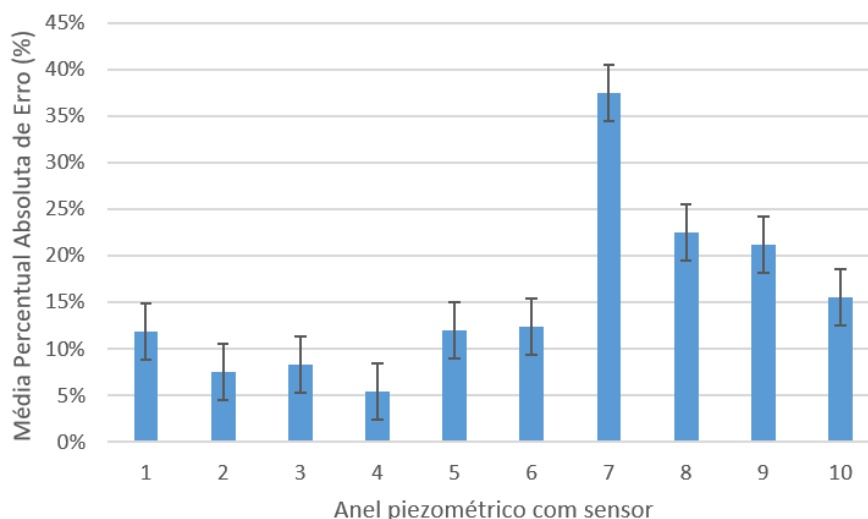


Figura 24 – Gráfico de erro médio absoluto percentual de cada sensor instalado nos anéis piezométricos (AUTOR, 2024)

Também foi possível notar que o erro médio absoluto foi maior nestes anéis piezométricos, em que o erro médio absoluto foi reduzindo conforme os anéis foram se afastando da curva em Tê.

Estes valores de erros maiores encontrados nos sensores da tubulação vertical estão relacionados a mudança de trajeto da tubulação, vista que estes se encontram após a curva em Tê, conforme Figura 9. Devido a mudança de trajeto, há o surgimento de uma vena contracta, fenômeno encontrado em tubulações quando há alteração do seu trajeto de forma brusca, causando perda de velocidade e consequentemente mudança em seu escoamento e nas pressões adquiridas (JENKINS, 2011).

Desta forma, foi registrado que a automação pode não ser adequada para medições em seções em que exista a mudança do trajeto da tubulação neste ângulo ou semelhantes.

3.3.1 Comparação com outros trabalhos

Comparando com o trabalho de Silva, 2021, que também foi desenvolvido nesta unidade piloto utilizando os sensores MDS20N0040D-S nos 10 anéis piezométricos, é possível notar que os erros encontrados também são maiores em pressões mais baixas (SILVA, 2021). A Tabela 10 conforme mostra os erros deste trabalho.

Tabela 10 - Erro percentual de cada sensor instalado no trabalho comparativo (SILVA, 2021)

Velocidade média do ar na entrada (m/s)	Anel piezométrico com sensor instalado e seus respectivos erros percentuais									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1,4	-16%	3%	-23%	-11%	-46%	7%	-25%	-6%	-25%	-31%
1,6	-10%	2%	-8%	-7%	-11%	-11%	-15%	0%	-17%	-8%
2,2	-4%	8%	-6%	-3%	-5%	-7%	0%	-3%	-10%	110%
2,6	-6%	5%	-11%	-3%	-11%	-5%	-6%	-4%	-11%	-4%
3,0	-4%	-1%	-5%	-2%	-10%	-7%	-6%	-13%	-16%	-6%
3,3	-5%	2%	-10%	-5%	-9%	-9%	3%	-9%	-11%	-10%
3,5	-4%	0%	-5%	-5%	-8%	-7%	-1%	-9%	-9%	-18%
3,7	-5%	3%	-9%	-2%	-7%	-6%	4%	-6%	-13%	-12%

Ainda quanto a estes, os sensores localizados na tubulação vertical, nos anéis piezométricos 7 até 10, tiveram erros maiores em relação aos outros sensores.

3.4 Aplicativos desenvolvidos

A interface desenvolvida (ANEXO IV) forneceu a medição a cada segundo de pressão e de umidade nos pontos definidos, após ser feita a comunicação com a automação (ANEXO V). A Figura 25 mostra a interface já conectada a porta de comunicação serial, e a unidade de medida de pressão configurada para Pa.

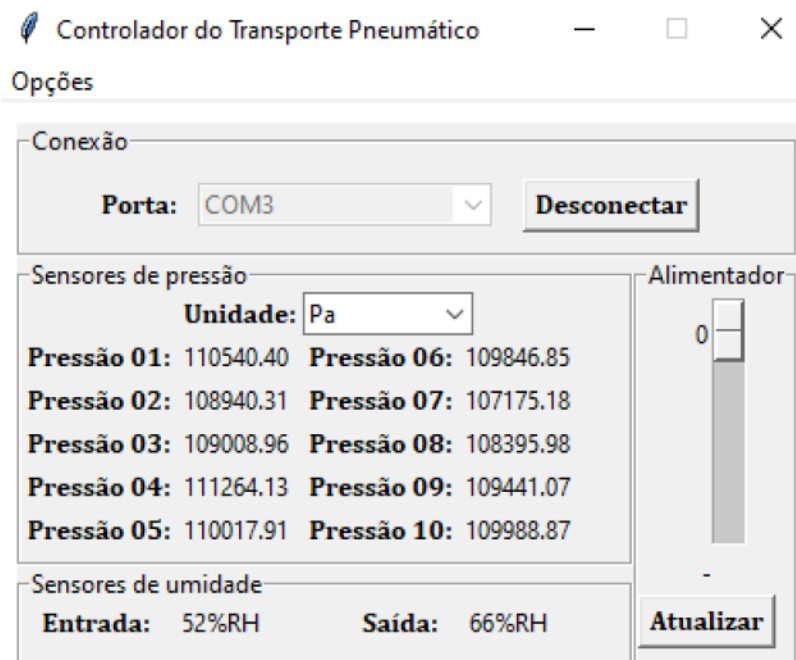


Figura 25 – Interface em linguagem Python da automação desenvolvida (AUTOR, 2023)

A interface necessita que seja feita inicialmente a conexão da porta serial do computador com o Arduino, selecionando a porta serial e clicando em um botão de nome “Conectar”. Em caso de a conexão não ser possível, há aparição de uma mensagem de erro, sendo necessário tentar novamente.

Após a conexão estabelecida, é possível a visualização dos dados adquiridos de pressão e umidade, sem necessidade de ferramentas de medição manuais para este processo, como era feito anteriormente. Estes são atualizados automaticamente a cada 1 segundo, podendo a pressão ser mostrada em mmca ou Pa.

O controle de velocidade do alimentador desenvolvido permite controlar o motor conforme esperado, porém é necessário que o aplicativo tenha 1 segundo para atualizar para velocidade definida, causando uma parada nas medições e atualizações neste período.

Foi notado que para movimentar o alimentador, estando inicialmente em inércia, é necessário um valor próximo de 30% com o recurso PWM. Após esta inércia, o controle da velocidade da automação digital se torna mais preciso, tendo em vista que é possível saber exatamente o percentual do sinal enviado para movimentação do motor.

Os relatórios podem ser gerados através do menu Opções, na parte superior da *interface*, tendo opção para relatórios com pressões fornecidas em mmca ou Pa. Há também a opção de relatórios para calibração dos sensores de pressão, gerando relatórios com o valor do conversor HX711 e não fornecendo a medição de umidade.

3.5 Relatórios gerados pelo aplicativo

A geração de relatórios foi feita a cada 1 segundo, tanto para pressões em mmca ou Pa quanto para calibração (ANEXO VI), obtendo de segundo a segundo os dados organizados em um relatório digital.

Foi efetuada a redução para menos de 1 segundo de tempo entre medições, porém alguns erros ocorriam como repetitividade de valores e erros na comunicação, causando a existência de dados inválidos ou intervalos maiores de tempo entre medições, respectivamente. Desta forma, o intervalo de 1 segundo se comprova como mais adequado para as medições e gerações de relatórios.

3.6 Variabilidade de medição

A constatação do aumento percentual da flutuação de valores adquiridos conforme o aumento da velocidade do ar na tubulação (ANEXO VII), podendo ser vista na Figura 26 o gráfico adquirido pelas medições do sensor do anel piezométrico 4, junto a sua linha de tendência, equações destas linhas e o coeficiente de correlação de Pearson.

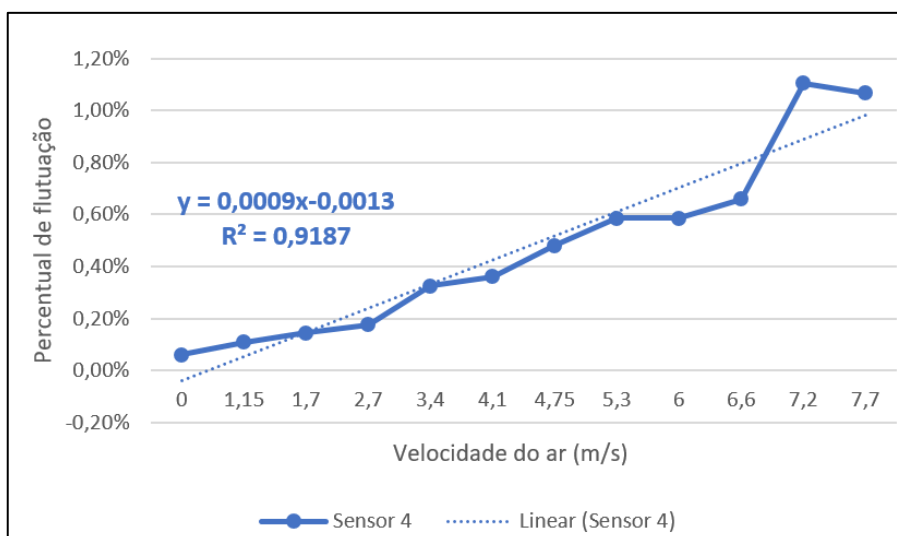


Figura 26 – Flutuação percentual dos valores adquiridos do sensor do anel piezométrico 4, em relação ao aumento da velocidade do ar na tubulação, com sua linha de tendência, equações destas linhas e o coeficiente de correlação de Pearson (AUTOR, 2024)

É possível constatar que a flutuação aumenta percentualmente conforme o aumento da velocidade do ar, demonstrando que o sistema tem a capacidade de captar estas variações ao usuário.

Conforme o efeito de vena contracta, esta flutuação é maior no anel piezométrico 7, encontrado na tubulação vertical logo após à curva Tê sem prolongamento.

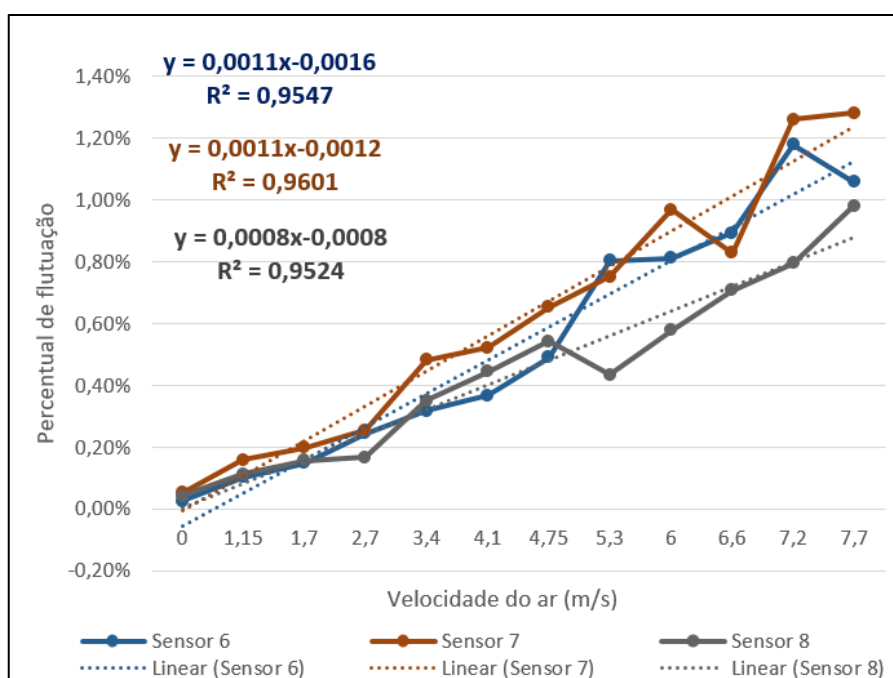


Figura 27 – Comparação da flutuação percentual de valores adquiridos dos sensores dos anéis piezométricos 6, 7 e 8, conforme o aumento da velocidade de ar na tubulação, com suas linhas de tendências, equações destas linhas e o coeficiente de correlação de Pearson (AUTOR, 2024)

Uma comparação desta flutuação entre os anéis piezométricos 6, 7 e 8 pode

ser vista na Figura 27, mostrando que a flutuação foi menor no anel piezométrico 6 em relação ao anel piezométrico 7, e posteriormente a flutuação é reduzida no anel piezométrico 8, principalmente em velocidades maiores. Ao analisar suas linhas de tendência, isso é facilmente visto.

4 CONCLUSÕES

Conforme o trabalho apresentado, é possível concluir que:

- A medição de pressão foi feita em 10 pontos ao decorrer da tubulação, através de anéis piezométricos, proporcionando medições por segundo ao decorrer da tubulação. A medição de umidade foi feita na entrada e saída da tubulação conforme desejado;
- O controle do alimentador de grãos foi implementado, permitindo o uso de recurso PWM para este, demonstrando ser funcional após passar o estado de inércia com uso de 30% ou mais do recurso PWM.
- A *interface* gráfica foi desenvolvida na linguagem Python, permitindo a visualização por segundo dos dados monitorados, além de permitindo comandos enviados ao sistema de controle do alimentador de grãos;
- A geração de relatórios feita em formato digital na extensão XLSX, sendo feito em medições de Pa, mmca e nos valores de calibração.

4.1 Trabalhos futuros

Com o propósito de novas pesquisas e melhorias com base neste trabalho, pode se ter em vista os seguintes desenvolvimentos:

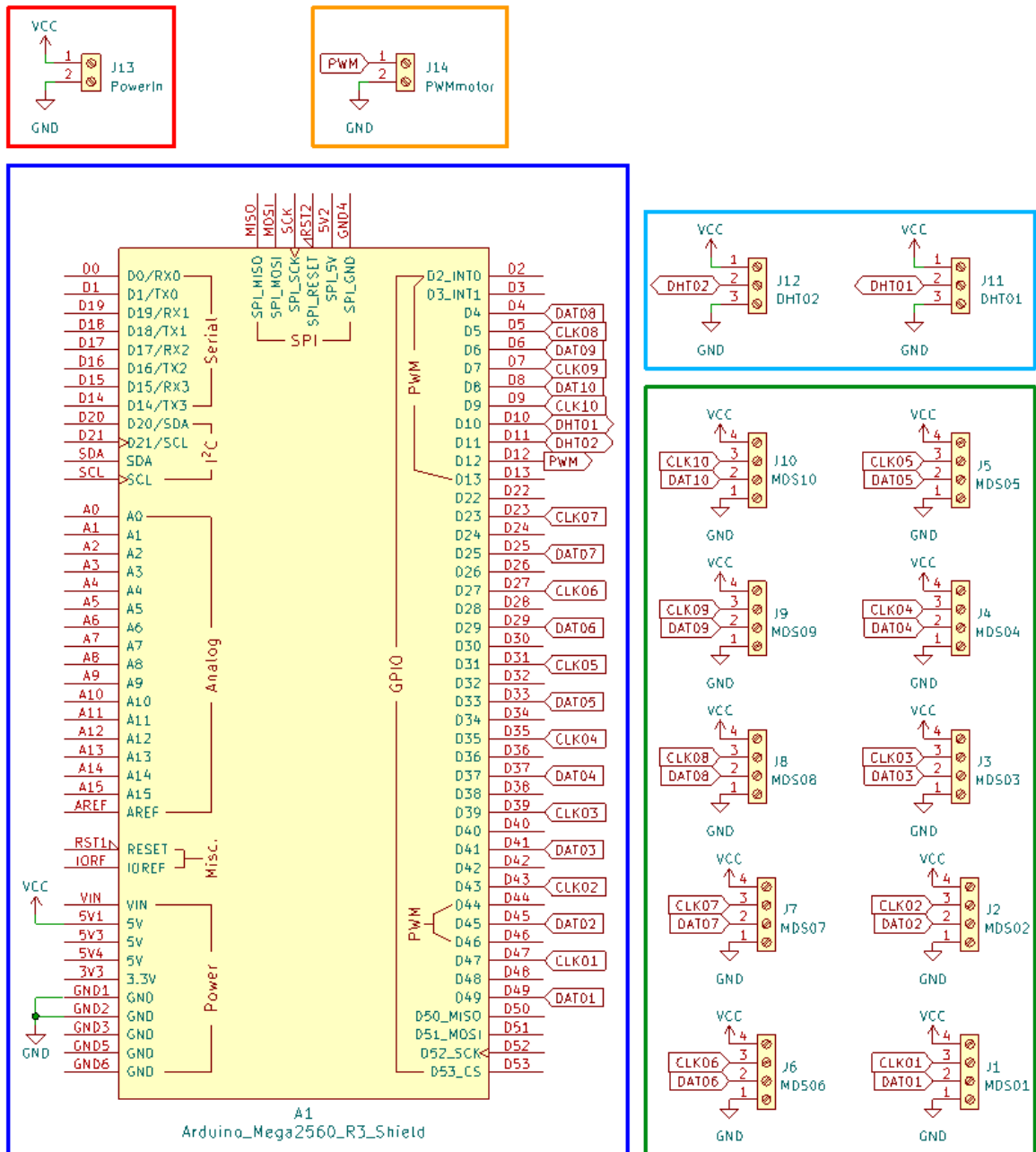
- O uso de sensores de mesmas variáveis, porém de outras naturezas, com intuito comparativo e de aquisição de dados com menor tempo de resposta entre medições, e/ou menores erros;
- O uso de controladores diferentes, ainda que de baixo custo, como ESP ou Raspberry, possibilitando acesso a tecnologias diferentes;
- Aplicação de recursos Web, para controle e monitoramento a longa distância via Internet e implementação de tecnologias sobre Internet das Coisas;
- Estudos voltados a redução do tempo entre medições, tanto para *interface* quanto para relatório;
- Uso de lógica paraconsistente na programação da automação, possibilitando estudar como esta pode influenciar no funcionamento de unidades laboratoriais.

5 REFERÊNCIAS

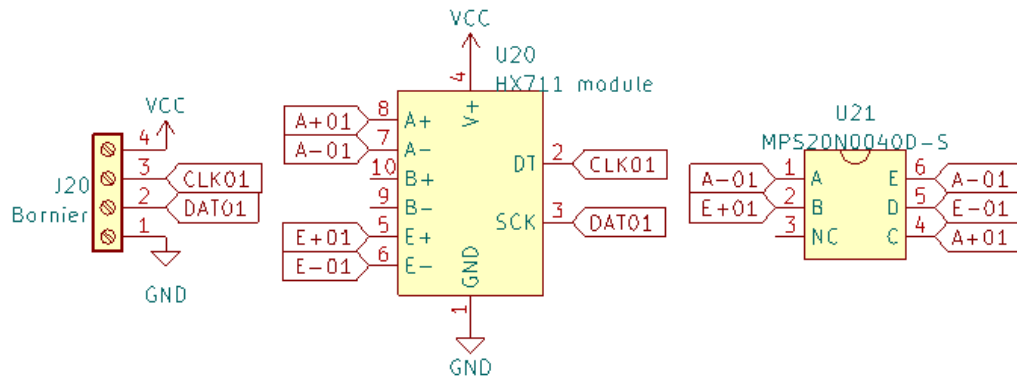
- ARDUINO. **Arduino**, 24 jan. 2023. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en>>.
- ARDUINO. Arduino Mega 2560 rev3. Disponível em: <<https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3?selectedStore=us>>.
- ARGENTA, Cecile A. M. et al. Desenvolvimento de um Sistema de Automação Residencial. **Revista Eletrônica de Iniciação Científica em Computação**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, Julho 2020.
- AVIA SEMICONDUCTOR. **HX711 - 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales**. [S.l.].
- CAP SYSTEM. **Calibração do sensor de pressão MPS20N0040D com Arduino**, 2020. Disponível em: <<https://capsistema.com.br/index.php/2020/12/01/calibracao-do-sensor-de-pressao-mps20n0040d-com-arduino/>>. Acesso em: 4 Outubro 2023.
- CITYSYSTEMS. **O que é PWM e Para que Serve?**, 26 Novembro 2016. Disponível em: <<https://www.citisystems.com.br/pwm/>>.
- COSTA, Vinicius S. et al. ARDUINO: UMA SOLUÇÃO SIMPLES E ECONÔMICA PARA ELETRIFICAR BATERIAS ACÚSTICAS. **Brazilian Journal of Production Engineering**, Porto Alegre, v. 10, n. 2, p. 349-357, Junho 2024. ISSN 2447-5580.
- DARTMOUTH. **Constant and Linear Functions**. Disponível em: <https://math.dartmouth.edu/archive/m1f03/public_html/lecture2.pdf>.
- E-RADIONICA. **Pressure Sensor MPS20N0040D-S**. [S.l.].
- FAMABRAS. **Conversão de Unidades de Pressão**. [S.l.]. 2013.
- FIRMINO, Silvio L. C.; JUNIOR, Deovaldo D. M.; ROSA, Vitor D. S. Análise do perfil de pressão em sistema de transporte pneumático de grãos de milho em fase diluída. **Anais do Encontro Internacional de Pós-graduação**, Santos, 5, n. 1, 16 Setembro 2021. 201-205.
- GOUVEIA, Rosimar. Pressão Hidrostática. **Toda Matéria**, 2020. Disponível em: <<https://www.todamateria.com.br/pressao-hidrostatica/>>. Acesso em: 12 abr. 2024.
- GUANGZHOU AOSONG ELECTRONICS CO., LTD. **Temperature and humidity module - DHT11 Product Manual**, 2022.
- INTEGRATED SENSING SYSTEMS, INC. MEMS Technology. **Integrated Sensing Systems**. Disponível em: <<https://mems-iss.com/mems-technologies/>>. Acesso em: 08 Janeiro 2023.
- JENKINS, Ajerandro. Sprinkler Head Revisited: Momentum, Forces, and Flows in Machian Propulsion. **European Journal of Physics**, v. 32, p. 1213-1226, Julho 2011. ISSN 1361-6404.
- JESUS, Adriano F. D. et al. APROVEITAMENTO DE ÁGUA DE AR CONDICIONADO COM USO DE ARDUÍNO E PAINÉIS FOTOVOLTAICOS PARA IRRIGAÇÃO AUTOMÁTICA DE HORTALIÇAS. **Brazilian Journal of Production Engineering**, Porto Alegre, v. 10, n. 2, p. 225-232, Maio 2024. ISSN 2447-5580.
- KHAIRNAR, Prajakta et al. Automation of Home (IoT) using Raspberry Pi. **International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology**, 30 Maio 2021. 235-239.
- KICAD. **KiCad EDA**, 2024. Disponível em: <<https://www.kicad.org/>>. Acesso em: 24 abr. 2024.
- KLEENAIR SYSTEMS. Dilute Phase. **Kleenair Systems**, 2014. Disponível em: <<http://www.kleenairsystems.net/dilute-phase.html>>. Acesso em: 04 Outubro 2024.
- LAMB, Frank. **Automação Industrial na Prática - Série Tekne**.
- LOURENÇO, Giovani A. **TRANSPORTE PNEUMÁTICO HORIZONTAL DE PARTÍCULAS DE BAIXA DENSIDADE: PROPOSTA DE UM SISTEMA DE**, Uberlândia, 2019.
- MACAWBER ENGINEERING, INC. Macawber Design Philosophy. **Macawber**, 2024. Disponível em: <<http://www.macawber.com/macawber-design-philosophy>>. Acesso em: 04 Outubro 2024.
- MESSIAS, Luis F. C. et al. Perda de Carga Experimental do Feijão Caupi em uma Unidade Piloto de Transporte Pneumático. **Anais do XIII Encontro Nacional de Pós-graduação**, Santos, 2024. 333-337.
- MONK, Simon. **Programação com Arduino: começando com Sketches**.
- ON SEMICONDUCTOR. TIP120, TIP121, TIP122 (NPN); TIP125, TIP126, TIP127 (PNP), n. 9, Novembro 2014.
- PENTEADO, Karoline. Métricas de avaliação para séries temporais. **Alura**, 2021. Disponível em: <<https://www.alura.com.br/artigos/metricas-de-avaliacao-para-series-temporais>>. Acesso em: 10 mar. 2024.
- PEREIRA, Rodrigo M. **Manejo de irrigação com automação de baixo custo no cultivo da alface**

- submetida a diferentes potenciais matriciais do solo**, Universidade de Brasília, 12 Julho 2021.
- PROVA INSTRUMENTS INC.. <https://www.prova.com.tw/img/download/AVM01&03-DATA%20SHEET-2017.pdf>. Disponível em: <<https://www.prova.com.tw/img/download/AVM01&03-DATA%20SHEET-2017.pdf>>. Acesso em: 2023 maio 23.
- PYTHON.LAND. Free Python Tutorial For Beginners: Learn Python. **Python Tutorial**, 24 jan. 2023. Disponível em: <https://python.land/python-tutorial#About_Python>.
- RASPBERRY PI TRADING LTD. **About Raspberry Pi 4 Model B**, 02 Janeiro 2023. Disponível em: <<https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>>.
- RASPBERRY PI TRADING LTD. **About us: Raspberry Pi**, 24 jan. 2023. Disponível em: <<https://www.raspberrypi.com/about/>>.
- RIVEROS, Hector G.; RIVEROS-ROSAS, David. Laminar and turbulent flow in water. **Physics Education**, v. 45, n. 3, p. 288-291, Maio 2010. ISSN 1361-6552.
- SANTOS, Sabrina M. D. **PROJETO E MONTAGEM DE UNIDADE PILOTO DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO EM FASE DILUÍDA PARA ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE A PERDA DE CARGA E A DISTRIBUIÇÃO DE PARTÍCULAS GRANULARES NA SEÇÃO TRANSVERSAL DE DUTOS INDUSTRIAIS**, Fevereiro 2009.
- SIEMENS. **SIMATIC S7-1200 - Pode ser adaptado de forma flexível as suas necessidades**, 24 Janeiro 2023. Disponível em: <<https://new.siemens.com/br/pt/produtos/automacao/controladores/s7-1200.html>>.
- SILOTTI, Natyelle O.; IAIONE, Fábio; MINAKAWA, Riccieli K. Z. Interface Homem-máquina Android para Sistemas Embarcados com Recursos Restritos. **Anais do Seminário Integrado de Software e Hardware**, Porto Alegre , v. 49, p. 37-48, Julho 2022. ISSN ISSN 2595-6205.
- SILVA, Hugo E. F. D.; KOGA, Roger S.; PINHEIRO, Érika C. N. M. Modelo de braço eletromecânico controlado por um arduino: aplicação na separação de materiais. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 8, n. 11, p. 71746-71765, Nov 2022. ISSN 2525-8761.
- SILVA, Rodney G. D. Aquisição eletrônica de dados da pressão estática, temperatura, velocidade do ar e rotação do ventilador utilizando o microcontrolador arduino em uma unidade experimental de piloto de transporte pneumático. **Brazilian Journal of Technology**, Curitiba, v. 4, n. 3, p. 120-143, Setembro 2021. ISSN 2595-5748.
- SÖDERBY, Karl. Getting Started with Arduino IDE 2.0. **Arduino IDE 2 Tutorials**, 19 jan. 2023. Disponível em: <<https://docs.arduino.cc/software/ide-v2/tutorials/getting-started-ide-v2>>.
- TAVARES, V. A. et al. Motor/ventilador para unidade piloto de transporte pneumático em fase diluída: deslocamento de grãos de soja. **Unisanta Science and Technology**, 6 Julho 2014. 1-5.
- TTP INDÚSTRIA MECÂNICA. PCB-Proto 1S. Disponível em: <<https://www.ttp.ind.br/pdf/PCB-Proto%201S.pdf>>. Acesso em: 30 abr. 2024.
- VENTBRAS. Ventilador Siroco. Disponível em: <<https://ventbras.com.br/produtos/ventilador-siroco/>>.
- VISHAY SEMICONDUCTOR. 4N25, 4N26, 4N27, 4N28, n. 1.8, 7 Janeiro 2010.
- WEG. FREQUENCY INVERTER MANUAL. **Series: CFW-08; Software: version 5.2X; Language: English; Document: 0899.5242/09**, Março 2009.
- WEG. Motor Elétrico Trifásico W22, dez. 2020. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hbf/h54/WEG-w22-motor-eletrico-trifasico-de-inducao-tecnico-mercado-africano-50058213-brochure-portuguese-web.pdf>>. Acesso em: 2024 Maio 23.
- ZANETTE, Felipe H. et al. INFLUÊNCIA DE TÊ SAÍDA DE LADO E CURVA DE TRÊS GOMOS NA PERDA DE CARGA A MONTANTE E A JUSANTE EM UNIDADE PILOTO DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO. **REVISTA CECILIANA**, Santos, 2 Junho 2010. 34-36.

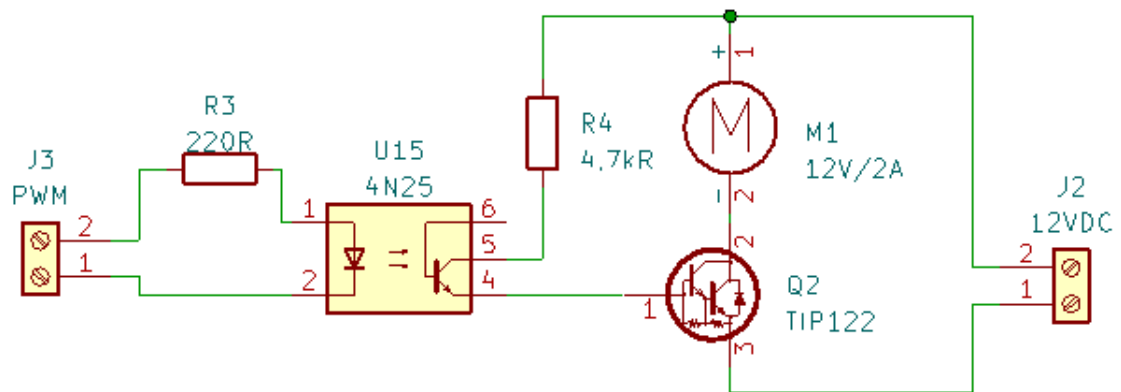
ANEXO I Projeto esquemático do circuito da placa de controle, contendo o Arduino Mega 2560 e seus componentes de conexão



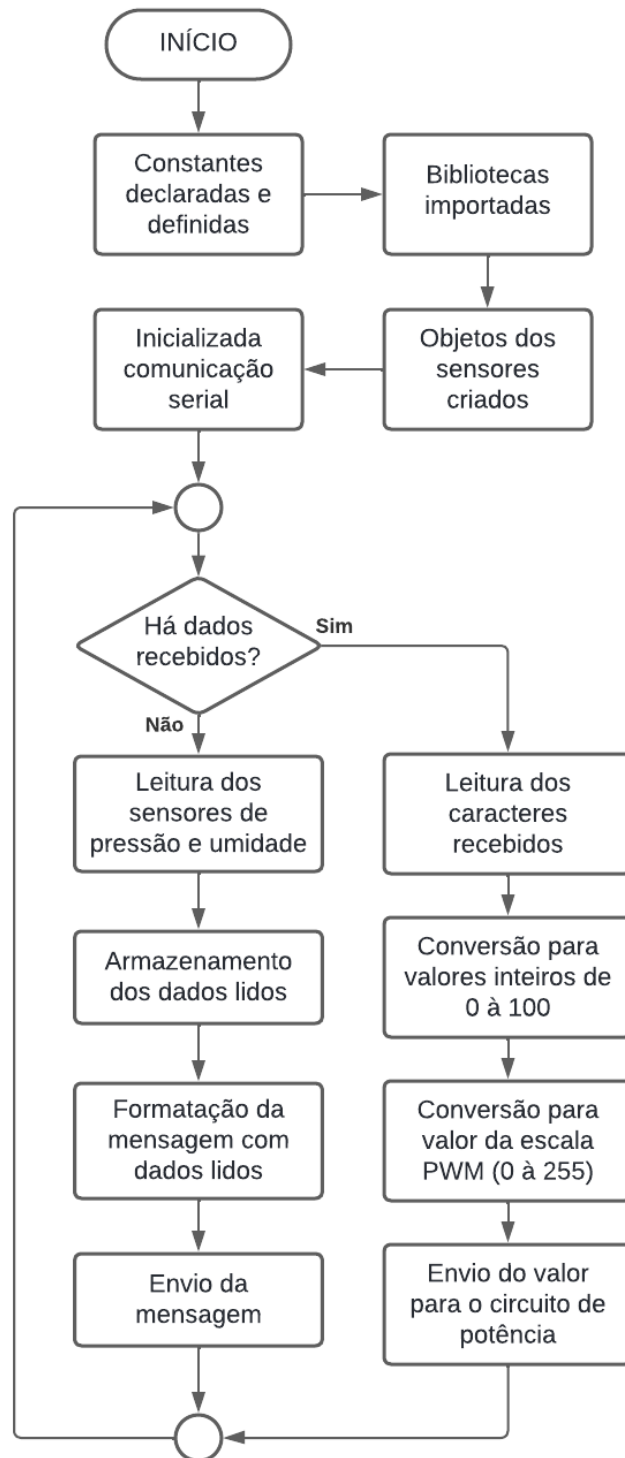
ANEXO II Projeto esquemático do circuito da placa de medição de pressão, contendo o sensor MDS20N0040D-S e o conversor analógico HX711



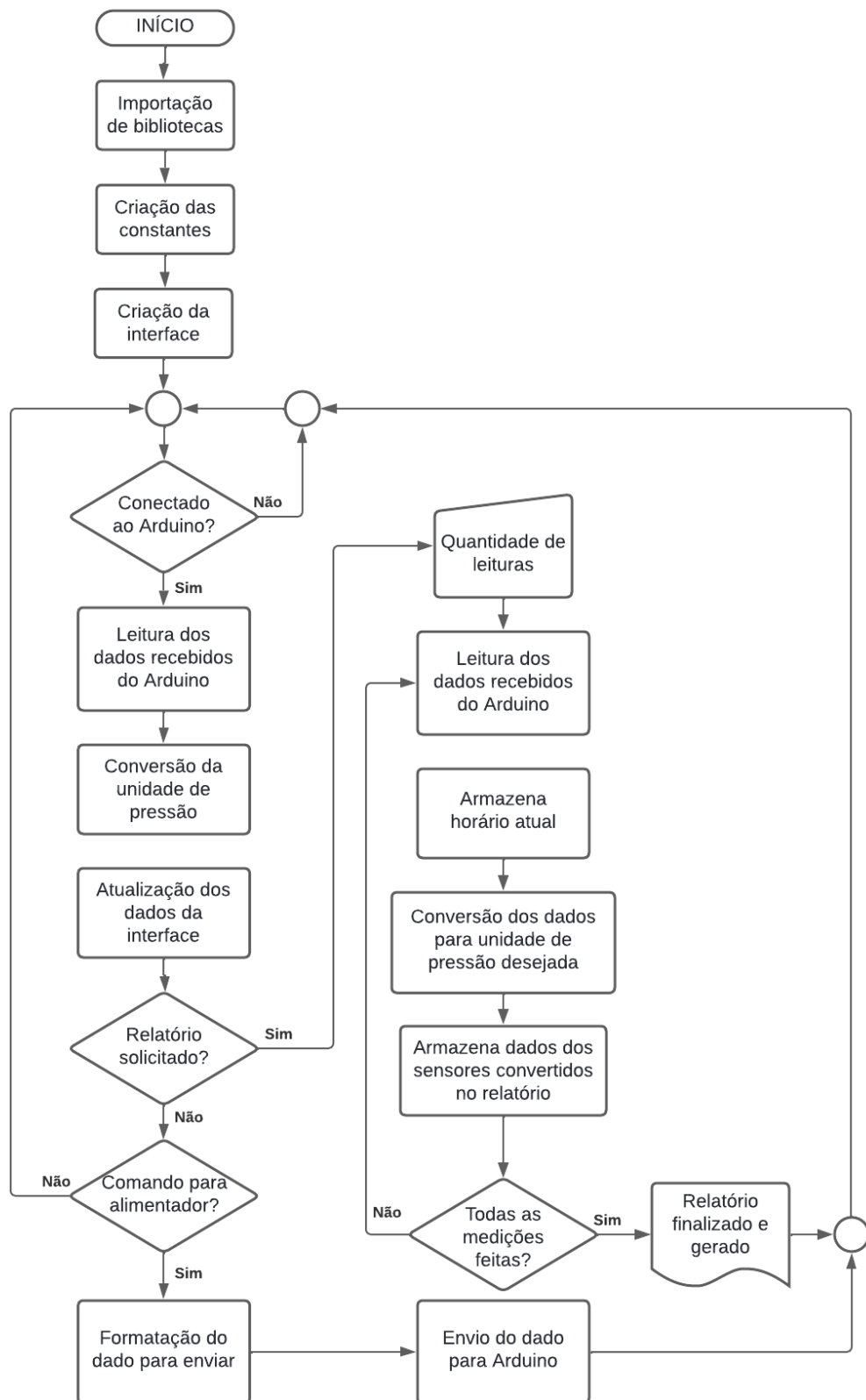
ANEXO III Projeto esquemático do circuito da placa dedicada a interligação da placa de controle da automação e o motor do alimentador



ANEXO IV Programação do Arduino para aquisição de dados dos sensores, e recebimento de comandos para o alimentador



ANEXO V Fluxograma da programação em Python da interface, geração de relatórios e envio de comandos do alimentador



ANEXO VI Exemplo de relatório gerado pela aplicação, com fins de calibração, com 30 medições válidas

Horário	Sensor 01 (n/a)	Sensor 02 (n/a)	Sensor 03 (n/a)	Sensor 04 (n/a)	Sensor 05 (n/a)	Sensor 06 (n/a)	Sensor 07 (n/a)	Sensor 08 (n/a)	Sensor 09 (n/a)	Sensor 10 (n/a)
15:18:38	6734937	6169683	6554231	6791596	6884629	6887009	6205756	6694314	6881800	14255587
15:18:39	6735262	6167882	6552123	6792602	6887927	6888733	6203520	6691051	6880599	14252161
15:18:40	6736790	6170006	6552741	6791150	6887656	6883943	6198226	6688951	6878764	14248964
15:18:42	6736742	6168657	6554711	6793779	6886950	6887639	6206151	6694456	6879784	14250590
15:18:43	6737442	6167501	6554611	6795622	6891967	6888921	6204435	6693373	6881484	14252513
15:18:44	6737494	6173250	6556698	6793731	6887691	6887251	6203083	6693800	6879282	14249366
15:18:46	6735788	6167612	6554871	6792506	6887134	6887904	6197579	6691705	6881633	14251028
15:18:47	6736191	6166642	6557679	6800801	6889334	6886161	6203427	6690018	6877987	14249671
15:18:48	6742354	6174340	6557211	6800107	6897821	6887771	6204827	6692162	6879506	14250129
15:18:49	6736987	6169125	6552167	6793823	6888868	6890851	6195539	6692679	6881468	14250378
15:18:51	6736713	6166635	6553610	6794112	6889546	6890217	6203753	6694075	6878519	14250985
15:18:52	6738014	6169330	6551212	6792611	6887485	6890098	6205669	6693229	6876362	14248322
15:18:53	6742558	6177199	6564116	6802819	6891369	6886300	6198036	6687038	6879695	14249288
15:18:55	6736477	6168136	6552980	6793122	6886869	6885846	6203452	6691934	6881203	14249204
15:18:56	6736619	6174511	6559057	6796479	6884922	6886552	6202720	6693763	6880011	14248012
15:18:57	6736552	6167567	6552791	6790864	6883783	6887056	6201398	6692386	6878278	14241572
15:18:58	6739326	6171993	6560148	6794182	6894711	6895421	6194623	6688402	6877307	14247407
15:19:00	6739872	6171642	6554245	6798038	6896261	6897625	6193130	6684894	6877420	14249044
15:19:01	6737158	6170107	6554638	6793152	6882052	6884105	6204440	6692868	6876930	14248228
15:19:02	6736886	6170130	6556219	6799875	6896826	6890594	6202842	6692125	6878192	14249691
15:19:04	6736583	6167991	6552772	6793020	6886965	6886016	6198028	6691902	6878348	14250604
15:19:05	6737716	6170899	6555014	6796614	6888681	6886171	6199240	6688049	6873456	14248639
15:19:06	6742641	6171573	6553138	6791405	6883587	6886866	6205764	6691821	6878298	14249730
15:19:07	6744462	6174536	6553258	6791497	6886928	6890594	6205377	6694119	6875115	14250397
15:19:09	6737626	6171159	6556213	6796668	6888219	6889633	6204208	6695792	6878963	14252576
15:19:10	6738422	6171068	6555203	6796540	6890508	6886466	6204327	6693524	6878638	14250594
15:19:11	6744514	6179548	6559139	6795501	6885385	6887776	6199497	6691425	6876606	14250791
15:19:13	6740551	6175103	6561759	6800239	6886407	6887723	6202212	6693952	6878318	14249875
15:19:14	6740391	6173383	6556131	6794437	6891519	6900049	6191590	6684901	6874286	14250738
15:19:15	6738442	6169126	6550962	6799610	6898744	6900576	6200551	6691742	6870757	14250685

ANEXO VII Gráficos de variabilidade de valores de pressão medidos em cada um dos sensores de pressão instalados na unidade

