



AUTOMAÇÃO PARA TRANSPORTADORES PNEUMÁTICOS VOLTADOS PARA ESTUDOS LABORATORIAIS

AUTOMATION TO PNEUMATIC CONVEYORS AIMING TO LABORATORY STUDIES
AUTOMATIZACIÓN DE TRANSPORTADORES NEUMÁTICOS PARA ESTUDIOS DE LABORATORIO

Yuri Silva Cruz Storino¹ & Carlos José de Lima²

^{1,2} Universidade Santa Cecília (UNISANTA)

¹ yurii_st@hotmail.com ² cdcfdlima@gmail.com

ARTIGO INFO.

Recebido: 05.07.2024

Aprovado: 26.08.2024

Disponibilizado: 12.09.2024

PALAVRAS-CHAVE: Arduino, Automação, Estudos Laboratoriais, Transporte Pneumático

KEYWORDS: *Arduino, Automation, Laboratory Studies, Pneumatic Conveyors.*

PALABRAS CLAVE: *Arduino, Automatización, Estudios de Laboratorio, Transporte Neumático.*

*Autor Correspondente: Storino, Y. S. C.

RESUMO

Estudos laboratoriais são necessários em diversas áreas e visam o aumento de eficiência em fabricação, produção, transporte e outras funções, sendo parte destes estudos feitos em universidades, assim tendo viabilidade o uso de novas tecnologias para auxiliar na execução destes desenvolvimentos. Este artigo tem como objetivo apresentar uma automação para transportadores pneumáticos voltada para estudos laboratoriais, com uso de tecnologias de baixo custo. Foi utilizada a plataforma Arduino no controle da automação, sensores de pressão MPS20N0040D-S e de umidade DHT11 para aquisição de dados, e um circuito de potência para controlar o alimentador de grãos, além de exibir os dados adquiridos e fornecer relatórios digitais desses. Os experimentos mostraram que foi possível ter um controle e monitoramento digital centralizado, com apenas um operador, com a capacidade de relatórios gerados com medições a cada segundo. Assim, foi possível verificar que o uso desta automação reduz o tempo para aquisição de dados, os operadores necessários para conduzir experimentos e erros passíveis dos operadores. Estes somados aos componentes de baixo custo demonstram a viabilidade da automação.

ABSTRACT

Laboratory studies are necessary in several areas and aim to increase efficiency in manufacturing, production, transport and other functions, with part of these studies being carried out in universities, thus making it viable to use new technologies to assist in the execution of these developments. This article aims to present automation for

pneumatic conveyors focus at laboratory studies, using low-cost technologies. The Arduino platform was used to control the automation, MPS20N0040D-S pressure sensors and DHT11 humidity sensors for data acquisition, and a power circuit to control the grain feeder, in addition to displaying the acquired data and providing digital reports thereof. The experiments showed that it was possible to have centralized digital control and monitoring, with just one operator, with the ability to generate reports with measurements every second. Thus, it was possible to verify that the use of this automation reduces the time for data acquisition, the operators needed to conduct experiments and operator errors. These added to the low-cost components demonstrate the viability of automation.

RESUMEN

Los estudios de laboratorio son necesarios en varias áreas y tienen como objetivo aumentar la eficiencia en la fabricación, la producción, el transporte y otras funciones, realizándose parte de estos estudios en las universidades, lo que hace viable el uso de nuevas tecnologías para ayudar en la ejecución de estos desarrollos. Este artículo tiene como objetivo presentar la automatización de transportadores neumáticos enfocados a estudios de laboratorio, utilizando tecnologías de bajo costo. Se utilizó la plataforma Arduino para el control del automatismo, sensores de presión MPS20N0040D-S y sensores de humedad DHT11 para la adquisición de datos, y un circuito de potencia para controlar el alimentador de granos, además de visualizar los datos adquiridos y proporcionar reportes digitales de los mismos. Los experimentos demostraron que era posible tener control y monitoreo digital centralizado, con un solo operador, con capacidad de generar informes con mediciones cada segundo. Así, se pudo verificar que el uso de esta automatización reduce el tiempo de adquisición de datos, los operadores necesarios para realizar experimentos y los errores de los operadores. Estos, sumados a los componentes de bajo coste, demuestran la viabilidad de la automatización.

INTRODUÇÃO

Com a intenção de adquirir conhecimento sobre características de certos processos industriais, experimentos laboratoriais são feitos, sendo estes elaborados em protótipos para ter um estudo de maior eficiência, sendo a automação grande aliada desse processo, possibilitando estudos mais sofisticados e eficientes (Tavares et al., 2014).

Um dos processos existentes é o transporte pneumático de grãos, que trabalha com o uso de fluídos em condição dinâmica, podendo ser ar ou gás inerte, para o transporte do material sólido. Dentre os estudos desse tipo de transportador, pode ser citado a investigação de friabilidade em curvas da tubulação, resposta sobre a velocidade do ar na tubulação, forma de alimentação dos sólidos no processo, entre outros, sendo todos esses feitos em laboratórios através de protótipos (Silva, 2021).

Normalmente, processos industriais são controlados por um CLP (controlador lógico programável), devido suas características robustas e proteções, porém seu alto custo inviabiliza em alguns casos seu uso, como para testes laboratoriais, além destes não gerarem relatórios diretamente, necessitando de um computador para isso (Lamb, 2015).

Com isso, a plataforma Arduino se destaca, tendo a mesma função como controlador de processos automatizados e menor custo e capacidade de controle de diversos dispositivos (Monk, 2013). Dentre algumas automações, pode ser citado o uso na automação sustentável da irrigação de hortaliças utilizando água de ar condicionados (Jesus et al., 2024) e na eletrificação de baterias acústicas (Costa et al., 2024), que adquiriram resultados positivos aos objetivos, somado a solução de baixo custo implementada.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma automação digital centralizada de uma unidade laboratorial de estudos de transporte pneumático, controlando a alimentação dos sólidos e adquirindo a leitura de pressão e umidades na tubulação. Além disso, a capacidade de geração de relatórios digitais de pressão e umidade na tubulação.

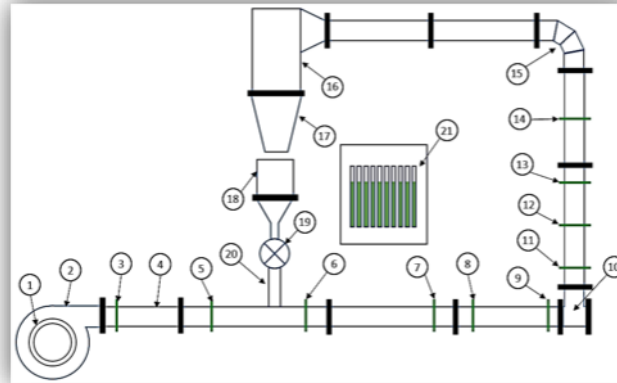
Para validação do trabalho, esta será instalada em uma unidade piloto de transporte pneumático, que não tem controle centralizado e é totalmente formada por instrumentos analógicos, tanto no controle como no monitoramento, causando a necessidade de muitos operadores, além de possíveis erros nas medições de pressão ou a ineficiente geração de relatórios dos dados adquiridos.

METODOLOGIA

UNIDADE PILOTO DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO

A automação será aplicada em uma unidade piloto (Figura 1) desenvolvida para testes laboratoriais, que utiliza ar como fluído para transporte, com dinâmica deste feita através de um motor elétrico e um ventilador centrífugo, controlado por um inversor de frequência. Onde a alimentação dos sólidos é feita através de um motor de corrente contínua, ligado a um mecanismo de válvula rotativa de compartimentos, controlado por um circuito analógico com ajuste por potenciômetro. Sendo que o monitoramento de pressão é realizado em 10 pontos específicos ao longo da tubulação da unidade piloto, através de anéis piezométricos, com o uso de manômetro em U com água como líquido, sendo aferida pelos operadores com o auxílio de um paquímetro (Silva, 2021).

Figura 1. Ilustração da unidade piloto de Transporte Pneumático da Universidade Santa Cecília. 1) Tubo de entrada de ar; 2) ventilador centrífugo; 3) anel piezométrico 1; 4) duto adaptador; 5) anel piezométrico 2; 6) anel piezométrico 3; 7) anel piezométrico 4; 8) anel piezométrico 5; 9) anel piezométrico 6; 10) Tê de saída sem prolongamento; 11) anel piezométrico 7; 12) anel piezométrico 8; 13) anel piezométrico 9; 14) anel piezométrico 10; 15) curva em gomos; 16) ciclone; 17) bolsa de passagem; 18) silo; 19) válvula rotativa; 20) Queda do alimentador em 90°; 21) manômetros em U

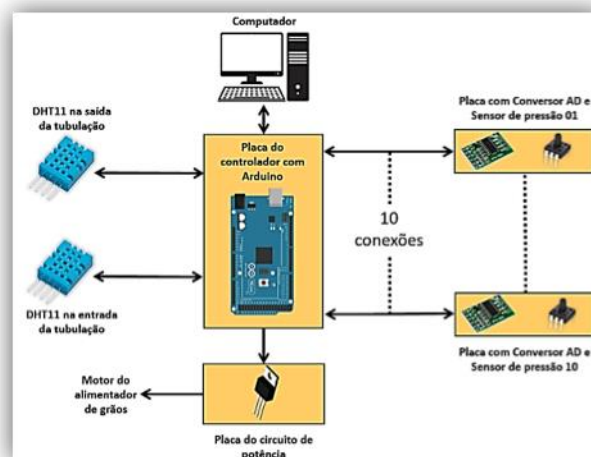


Fonte: Autores (2024).

INSTRUMENTAÇÃO DA AUTOMAÇÃO

Na instrumentação digital utilizada, há um dispositivo Arduino para o controle do processo, os sensores MPS20N0040D-S e DHT11 para medição de pressão e umidade, respectivamente, um circuito de potência para controle do motor do alimentador de grãos (Figura 2). Haverá também um aplicativo para centralizar o monitoramento de dados de pressão e umidade, controle do alimentador de grãos e geração de relatórios através de um computador. A calibração dos sensores de pressão foi executada para adquirir a equação linear e erros de cada um desses, e experimentos foram realizados para avaliar as vantagens que esse sistema pode trazer aos testes laboratoriais realizados.

Figura 2. Representação da arquitetura dos componentes eletrônicos envolvidos na automação



Fonte: Autores (2024).

PLACA DE CONTROLE DO PROCESSO

Para o controle do processo foi desenvolvida uma placa dedicada com um Arduino Mega 2560 rev3 e seus conectores para os outros instrumentos da automação. Sua programação

feita na IDE (Interface Development Environment) dedicada do Arduino, contendo as bibliotecas e ferramentas para tal (Arduino, 2023).

MONITORAMENTO DE PRESSÃO E UMIDADE

Para o monitoramento da pressão na tubulação, foram desenvolvidas 10 placas contendo o sensor de pressão MPS20N0040D-S, utilizado para medição de pressão de pneus automotivos, bombas pneumáticas e outros (E-Radionica, n.d.), e o conversor analógico digital HX711, responsável pela conversão dos dados do sensor para dados analógicos para leitura do Arduino (Avia Semiconductor, n.d.).

Para monitoramento da umidade, foram utilizados dois sensores DHT11, um na entrada de ar e outro na saída, tendo fios soldados diretamente nos contatos do sensor (Guangzhou Aosong Electronics Co., LTD., 2022).

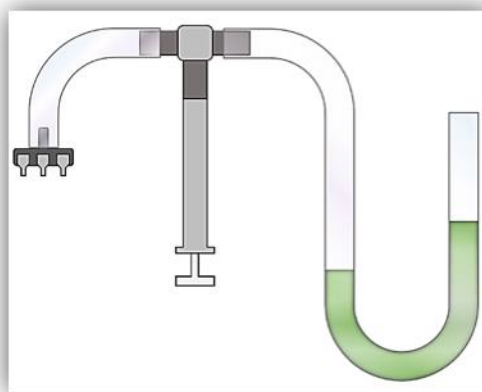
PLACA DO CIRCUITO DE POTÊNCIA

Para o circuito de potência do alimentador, foi desenvolvido um circuito dedicado que, através de um sinal do Arduino, regula a velocidade do motor do alimentador, para isso, foi utilizado um transistor TIP122 (ON Semiconductor, 2024).

CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE PRESSÃO

Para validação do uso dos sensores MPS20N0040D-S, foi feito um sistema para calibração (Figura 3), comparando os valores adquiridos com um instrumento de medição como referência. Para esse sistema, foi utilizado um conector Y de plástico, sendo instalado em uma conexão o sensor, em outra um manômetro em U como instrumento de referência, e na última conexão um êmbolo de pressão de 20ml para variação da pressão no sistema (CAP System, 2020).

Figura 3. Ilustração do sistema de calibração, com o sensor de pressão MPS20N0040D-S a esquerda, o êmbolo no centro e o manômetro em U a direita



Fonte: Autores (2024).

As medições foram feitas de 0mmca à 50mmca (milímetros de coluna de água), em passos de 10mmca no manômetro. Os valores adquiridos foram anotados e comparados com os valores fornecidos pelo sensor. Sendo que, os valores da pressão adquirida pelo manômetro em U dados em mmca foram convertidos para Pa (Pascal) conforme conversão do Instituto de Pesos e Medidas do Estado de São Paulo, considerando a pressão atmosférica em 1 atm ou 101.325 Pa, conforme cidade de Santos, São Paulo (Famabras, 2013). Assim há a Equação

1, em que “ p_{Pa} ” é a pressão em Pa, “101325” é a pressão atmosférica da região em Pa, “ p_{mmca} ” é a pressão em mmca, e “9,80665” é a constante resultante do produto da densidade da água com a aceleração da gravidade (Gouveia, n.d.).

$$p_{Pa} = 101325 + (p_{mmca} * 9,80665) \quad (1)$$

As placas de monitoramento de pressão fornecendo dados com variação linear, possibilitaram o uso do método de equação linear de 1º grau para calcular os parâmetros de cada sensor, tendo como referência e medição inicial 0mmca no manômetro. Para isso, foi necessário calcular a constante angular “m” e a linear “b” de cada sensor, conforme Equação 2, em que “ $f(x_n)$ ” é o valor da pressão adquirida, e “ x_n ” é o valor da medição dado pelo sensor.

$$f(x_n) = mx_n + b \quad (2)$$

Foi também calculado o coeficiente de correlação de Pearson demonstrando a relação dos valores gerados pelo sensor e dos valores calculados através da equação da reta gerada (Darthmouth, n.d.).

APLICATIVO PARA SUPERVISÃO

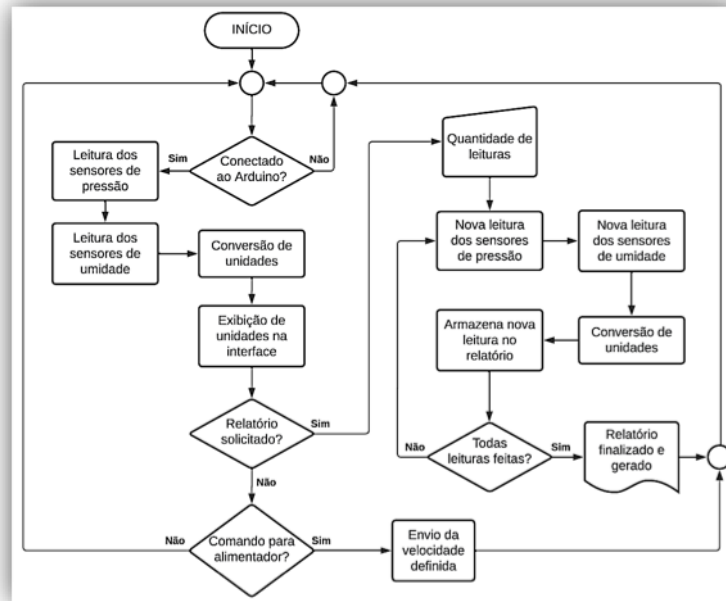
O aplicativo foi desenvolvido em linguagem Python e, após sua execução, necessita que o usuário gere a comunicação entre computador e o Arduino, podendo isso ser feito por uma lista de portas de comunicação e um botão (

Figura 4).

Após a comunicação gerada, o monitoramento de pressão e umidade atualiza a cada segundo de forma automática, podendo o usuário alterar a exibição dos dados de pressão de mmca para Pa. A alteração da velocidade do alimentador ocorre através de um cursor, que define o percentual de 0% a 100% do sinal a ser enviado ao circuito, e ao pressionar de um botão, envia esse dado para então atualizar a velocidade do motor.

Foi possível criar relatórios em planilhas no formato XLSX, que podem ser gerados através de um menu superior, fornecendo as opções de relatórios em planilha para pressões em Pa, mmca ou para novas calibrações, sendo o último apenas para o caso dessas serem necessárias.

Figura 4. Fluxograma do funcionamento do aplicativo de supervisão, demonstrando o processo de monitoramento, controle do motor do alimentador e geração de relatórios



Fonte: Autores (2024).

USO DA AUTOMAÇÃO NA UNIDADE PILOTO

Utilizando os recursos de geração de relatórios do aplicativo, o método de calibração foi repetido, apenas com ar nas tubulações, tendo como referência a medição dos manômetros em U, com a intenção de adquirir as equações lineares de cada sensor para a instalação na unidade piloto.

Nessa calibração, foram feitas 12 medições em cada anel piezométrico, tendo cada medição velocidades de fluido diferentes, sendo a primeira com o ar estático. Para cada medição, foi gerado um relatório de 60 medições, utilizando a média destas para calcular os parâmetros das equações lineares.

Após a geração das equações lineares, foi possível calcular as medições em mmca e Pa, e o erro médio absoluto (MAE) de cada sensor, conforme Equação 3, em que “ med_{man} ” são as medições referenciais do manômetro em U, “ med_{aut} ” são as medições geradas pela automação e “ n ” é a quantidade de ensaios, desconsiderando o ensaio inicial referencial de valor zero (Penteado, 2021).

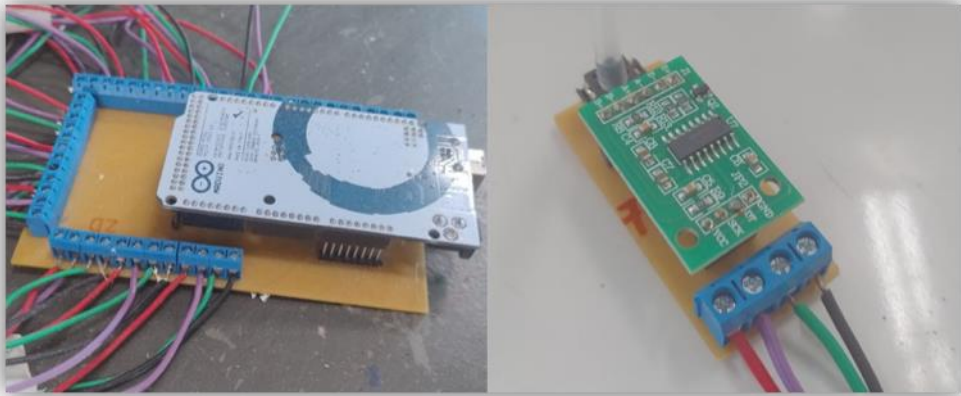
$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |med_{man} - med_{aut}| \quad (3)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

PLACAS DESENVOLVIDAS

As placas desenvolvidas (Figura 5) foram satisfatórias para suas funções, tanto a de controle como a de medição de pressão, sendo utilizados fios de cobre 3mm com cores diferentes, conforme sua função elétrica.

Figura 5. A esquerda, placa de controle com Arduino Mega e seus conectores; a direita, placa de medição de pressão com sensor MPS20N0040D-S e conversor HX711, do anel piezométrico 7



Fonte: Autor (2024).

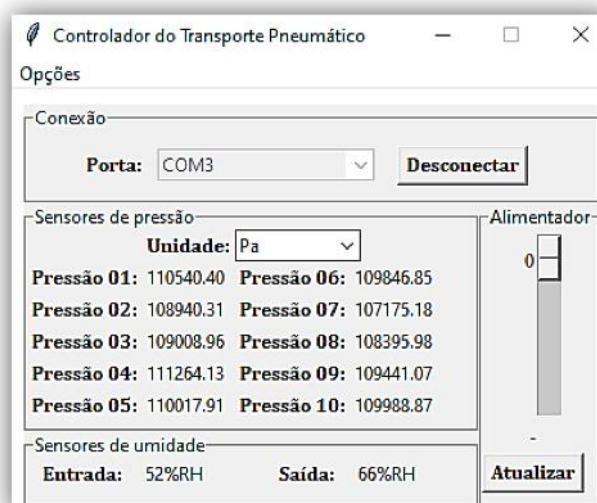
APLICATIVO DE SUPERVISÃO

A *interface* do aplicativo foi feita de forma simples (Figura 6), permitindo a comunicação deste com o Arduino através de uma lista de opções e botão, e com essa executada, é permitida a exibição dos dados de pressão dos anéis piezométricos na unidade de pressão solicitada, e umidade da entrada e saída em %RH (Relative Humidity)

Quanto a atualização da velocidade do alimentador, foi possível notar que essa ocorre, porém, a *interface* fica aproximadamente 1 segundo sem atualização dos dados de pressão e umidade, em seguida voltando ao funcionamento normal.

Os relatórios podem ser gerados com um máximo de 500 medições, sendo necessário aproximadamente 1 segundo para cada medição, não permitindo monitoramento ou alteração de velocidade do alimentador enquanto ele está sendo gerado. Com essa aplicação, foi possível ter os dados adquiridos de forma mais prática, e já organizados digitalmente em um relatório, além dos dados já estarem centralizados.

Figura 6. *Interface* do aplicativo de supervisão, com conexão com Arduino executada na porta COM3, as medições de pressão sendo feitas em Pa e umidade feitas em %RH



Fonte: Autores (2024).

CALIBRAÇÃO DOS Sensores

Aplicado o método de calibração em cada um dos sensores MPS20N0040D-S, foi possível comparar os valores do manômetro em U com o sensor em cada anel piezométrico, demonstrando semelhanças entre ambos. O menor coeficiente linear adquirido foi 0,986, comprovando a boa confiabilidade da automação.

PERCEPÇÕES APÓS INSTALAÇÃO NA UNIDADE PILOTO

Utilizando o recurso de relatórios para fazer a calibração da automação instalada na unidade piloto, foi possível comparar os dados e adquirir o erro médio absoluto para cada sensor (Tabela 1).

Tabela 1. Erro médio absoluto sobre as medições, em mmca, nos anéis piezométricos, do manômetro em U com os sensores da automação

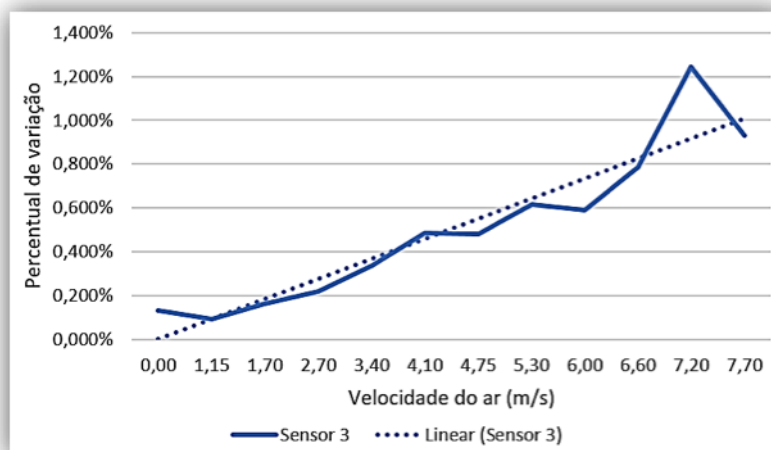
Anel piezométrico com sensor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Erro médio (%)	11,8	7,5	8,4	5,5	12,0	12,4	37,5	22,5	21,2	15,6

Fonte: Autores (2024).

Analisando os erros, os sensores dos anéis piezométricos 1 ao 6, e os sensores dos anéis 7 a 10, pode ser notado uma diferença entre seus erros. A diferença de erro desses dois grupos pode estar relacionada com a existência da curva em T sem alongamento entre eles, podendo gerar variações na dinâmica do ar.

Também foi analisada a resposta dos sensores para diversas velocidades, e com uso dos relatórios gerados, foi possível notar o aumento percentual da variabilidade de valores conforme o aumento da velocidade do fluido, tendo como base a média dos valores adquiridos (Figura 7), mostrando mais uma capacidade da automação desenvolvida.

Figura 7. Variação percentual dos valores adquiridos pelo sensor no anel piezométrico 3, conforme a variação da velocidade do ar na tubulação, e sua linha de tendência linear



Fonte: Autores (2024).

A praticidade para aquisição dos dados com uso da automação digital demonstra algumas das vantagens que essa automação pode trazer nos estudos laboratoriais, sejam acadêmicos ou profissionais.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho alcançou seu objetivo, centralizando o controle do alimentador e monitoramento da pressão e umidade em uma mesma *interface*. Possibilitando apenas um operador fazer o

controle e monitoramento da unidade piloto, comprovam a eficácia da automação. O uso de componentes de baixo custo, comparado a dispositivos industriais, demonstram a importância dessa implementação na área de experimentos laboratoriais.

Para trabalhos futuros, o uso e teste de outros sensores na intenção de reduzir o tempo entre medições e seus erros é algo a ser projetado. Além disso, uso de recursos como acesso à internet ou inteligências artificiais podem auxiliar no monitoramento e controle das estações de forma remota e com maior eficiência no controle do alimentador de grãos.

REFERÊNCIAS

- Arduino (2023). *Arduino*. Recuperado de <https://www.arduino.cc/en>
- Avia Semiconductor (n.d.) *24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales*. Recuperado de <https://c1555f5ec9.clvaw-cdnwnd.com/34662fcf1f1e607c561442431023ac8e/200012104-03bd803bdb/HX711%20Datasheet.pdf>
- CAP System (2020). *Calibração do sensor de pressão MPS20N0040D com Arduino*. Recuperado de <https://capsistema.com.br/index.php/2020/12/01/c-alibracao-do-sensor-de-pressao-mps20n0040d-com-arduino/>
- Costa, V. S., Oliveira, H. T. P., Santos Jr., J. W. P., & Pereira, L. D. L. (2024). Arduino: Uma solução simples e econômica para eletrificar baterias acústicas. *10(2)*, 349-357. <https://doi.org/10.47456/bjpe.v10i2.43953>
- Dartmouth Department of Mathematics (n.d.). *Constant and Linear Functions*. Recuperado de https://math.dartmouth.edu/archive/m1f03/public_html/lecture2.pdf
- E-Radionica (n.d.). *Pressure Sensor MPS20N0040D-S*. Recuperado de https://softroboticstoolkit.com/files/sorotoolkit/files/mps20n0040d-s_datasheet.pdf
- Famabras (2013). *Conversão de Unidades de Pressão*. Recuperado de <https://www.famabras.com.br/files/ugd/fd4f8754201d2af81248cb8656a7ec32f71f06.pdf>
- Gouveia, R. (n.d.). *Pressão Hidrostática: fórmula, exemplo e exercício*. Recuperado em <https://www.todamateria.com.br/pressao-hidrostatica>
- Guangzhou Aosong Electronics Co., LTD. (2022) *Temperature and Humidity module – DHT11 Product Manual*. Recuperado de <http://www.aosong.com/userfiles/files/media/DHT11%E6%B8%A9%E6%B9%BF%E5%BA%A6%E4%BC%A0%E6%84%9F%E5%99%A8%E8%AF%B4%E6%98%8E%E4%B9%A6%EF%BC%88%E4%B8%AD%EF%BC%89%20A0-1208.pdf>
- Jesus, A. F., Marco, M. V. M., Rios, P. L., Luz, A. M. G., & Pereira, L. D. L. (2024). Aproveitamento de água de ar condicionado com uso de Arduino e painéis fotovoltaicos para irrigação automática de hortaliças. *Brazilian Journal of Production Engineering*. *10(2)*, 225-232. <https://doi.org/10.47456/bjpe.v10i2.44255>
- Lamb, F. (2015). *Automação Industrial na Prática*. 1a ed. Porto Alegre: AMGH
- Monk, S. (2017) *Programação com Arduino: Começando com Sketches*. 2a ed. Porto Alegre: Bookman.
- ON Semiconductor (2024). *Plastic Medium-Power Complementary Silicon Transistors. TIP120, TIP121, TIP122 (NPN); TIP125, TIP126, TIP127 (PNP)*. Recuperado de <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/tip120-d.pdf>
- Penteado, K. (2021). *Métricas de avaliação para séries temporais*. Recuperado de <https://www.alura.com.br/artigos/metricas-de-avaliacao-para-series-temporais>
- Silva, R. G. (2021) Aquisição eletrônica de dados da pressão estática, temperatura e velocidade do ar em unidade piloto de transporte pneumático utilizando placa microcontrolada. (Dissertação de mestrado) Universidade Santa Cecília, Santos, SP. Recuperado de https://unisanta.br/arquivos/mestrado/mecanica/dissertacoes/Dissertacao_RODNEYGOMESDASILVA521.pdf
- Tavares, V. A., Roseno, K. T. C., Moraes Jr., D., & Santos, A. R. (2014). Motor/ventilador para unidade piloto de transporte pneumático em fase diluída: deslocamento de grãos de soja. *Unisanta Science and Technology*. *3(1)*, 1-5. <https://periodicos.unisanta.br/index.php/sat/article/view/260>