

Calibração, automação e controle de um sensor de vazão efeito Hall para uma coluna de destilação

Calibration, automation and control of a Hall effect flow sensor for a distillation column

Calibración, automatización y control de un sensor de flujo de efecto Hall para una columna de destilación

Recebido: 21/08/2022 | Revisado: 02/09/2022 | Aceito: 03/09/2022 | Publicado: 11/09/2022

Renan Bispo Santos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1784-8708>

Universidade Católica de Pernambuco, Brasil

E-mail: renan.bispo@unicap.br

Diego Guedes de Lima Lemos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0632-7712>

Escola de Referência Ensino Médio Ageu Magalhães, Brasil

E-mail: qdiegolima@hotmail.com

Yago Fraga Ferreira Brandão

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9236-3842>

Universidade Federal de Pernambuco, Brasil

E-mail: yagoffb9@gmail.com

Hilário J. B. de Lima Filho

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4954-3925>

Universidade Católica de Pernambuco, Brasil

E-mail: hilario@unicap.br

Resumo

A vazão é uma das variáveis de processo essenciais em plantas de destilação, sendo necessário sua constante medição e controle, para alcançar o melhor desempenho da planta. Este trabalho tem como objetivo garantir o processo de automação, controle e calibração de instrumento de medição de vazão em planta experimental de destilação. Foi criado um programa no IDE do Arduino de forma a determinar o coeficiente do medidor de vazão, com uma vazão ajustada (manualmente) na faixa de 0,3 L/min (indicado pelo serial), medindo a vazão real com o auxílio de uma proveta de 500 mL deixando a vazão pré-definida preencher com o auxílio de uma mangueira a proveta durante 1 minuto. Com o coeficiente definido para o medidor (modelo YF-S401) foram escolhidas cinco vazões, iniciando em 0,25 L/min até 1,25 L/min. Com o auxílio do IDE e do Labview foi criado um VI (Virtual Instrument) combinando o Labview/LINX com o auxílio da ferramenta VISA (Virtual Instrument Software Architecture). Em ambas as partes do experimento foram utilizadas resposta de superfície (auxiliado pelo software STATISTICA 10) para a relação entre frequência, pulso e vazão. Após os resultados obtidos no experimento manual e no experimento automatizado, as correlações obtidas e as respostas de superfície encontradas sugerem uma resposta eficaz da integração de LINX e VISA para a medição da vazão, além de confirmar a calibração (devido ao fato do programa corrigir o erro utilizando as correlações). Sendo possível afirmar que o programa desenvolvido pode ser integrado em um sistema de automação mais completo.

Palavras-chave: LabView; Arduino; MSR; IDE.

Abstract

Flow is one of the essential process variables in distillation plants, and its constant measurement and control are necessary to achieve the best performance. This work aims to guarantee the process of automation, control, and calibration of a flow measurement instrument in an experimental distillation plant. A program was created in the Arduino IDE to determine the flowmeter coefficient, with a flow adjusted (manually) in the range of 0.3 L/min (indicated by the serial), measuring the actual flow rate with the aid of a 500 mL beaker, allowing the pre-defined flow rate to fill the beaker with the aid of a hose for 1 minute. With the coefficient defined for the meter (model YF-S401), five flows were chosen, starting at 0.25 L/min to 1.25 L/min. With the help of the IDE and Labview, a VI (Virtual Instrument) was created combining Labview/LINX with the help of the VISA (Virtual Instrument Software Architecture) tool. In both parts of the experiment, surface response (assisted by the STATISTICA 10 software) was used for the relationship between frequency, pulse, and flow. After the results obtained in the manual experiment and the automated experiment, the correlations obtained and the surface responses found to suggest an effective response of the integration of LINX and VISA for the measurement of flow, besides confirming the calibration (because the

program corrects the error using the correlations). It is possible to state that the developed program can be integrated into a more complete automation system.

Keywords: LabView; Arduino; RSM; IDE.

Resumen

El caudal es una de las variables de proceso esenciales en las plantas de destilación, siendo necesario su constante medición y control para conseguir el mejor rendimiento. Este trabajo tiene como objetivo garantizar el proceso de automatización, control y calibración de un instrumento de medición de flujo en una planta de destilación experimental. Se creó un programa en el IDE de Arduino para determinar el coeficiente del caudalímetro, con un caudal ajustado (manualmente) en el rango de 0,3 L/min (indicado por el serial), midiendo el caudal real con la ayuda de un vaso de precipitados de 500 ml, permitiendo que el caudal predefinido llene el vaso con la ayuda de una manguera durante 1 minuto. Con el coeficiente definido para el medidor (modelo YF-S401) se eligieron cinco caudales, desde 0,25 hasta 1,25 L/min. Con la ayuda del Labview, se creó un VI (Virtual Instrument) combinando Labview/LINX con la ayuda de la herramienta VISA (Virtual Instrument Software Architecture). En ambas partes del experimento se utilizó la respuesta de superficie (asistida por el software STATISTICA 10) para la relación entre frecuencia, pulso y caudal. Luego de los resultados obtenidos en los experimentos manuales y automatizado, las correlaciones obtenidas y las respuestas de superficie encontradas sugieren una respuesta efectiva de la integración de LINX y VISA para la medición de caudal, además de confirmar la calibración (debido a que el programa corrige el error usando las correlaciones). Es posible afirmar que el programa desarrollado puede integrarse en un sistema de automatización más completo.

Palabras clave: LabView; Arduino; MSR; IDE.

1. Introdução

1.1 Medição de Vazão

O princípio de medição de uma variável é como o dado será coletado; cada princípio de medição usa uma maneira diferente de gerar e obter as informações de nível, vazão, pressão entre outros parâmetros (Cosimato, 2022). Os sistemas de medição de vazão são de extrema importância para o controle e monitoramento de um sistema de distribuição de fluxo, onde seu acompanhamento adequado permite a descoberta de vazamentos, desvios entre outros problemas (Cavalcanti & dos Santos, 2021).

Na classificação dos medidores de vazão instantânea, a característica comum entre eles é que proporcionam uma medida instantânea da vazão. Nessa categoria se encontra a maioria dos medidores comumente usados na indústria, destacando-se entre eles os eletromagnéticos, os baseados em pressão diferencial, os do tipo turbina, ultrassônicos e o Coriolis (Parra Sejas, 2016).

O sensor tipo turbina é simples e permite uma boa acurácia contando o número de vezes que as lâminas das hélices passam pelo ponto que contém o sensor de proximidade magnético, que produz pulsos de tensão; se usar um circuito eletrônico para contar e acumular o número total de pulsos durante um determinado intervalo de tempo será obtida a vazão (Chichanoski, 2018).

O YF-S401 é uma estrutura de engrenagem em formato de catavento com um ímã acoplado no rotor que trabalha em conjunto com um sensor hall, emitindo um sinal pulsado com frequência proporcional a vazão. Através destes pulsos é possível mensurar a vazão do líquido, por sua frequência (Leong et al. 2016).

1.2 Efeito Hall

Conforme Souza et al. (2021), o sensor Hall obedece a lei da Força de Lorentz, na qual relata sobre a o movimento dos elétrons sujeitos a campos magnéticos. As linhas equipotenciais que cruzam perpendicularmente um fluxo de corrente, de um material que não está exposto a um campo magnético, são linhas retas. A força de Lorentz no movimento de elétrons no material é descrita pela Equação 1:

$$F = (q * v)B \quad (1)$$

Onde q é carga do elétron, B vetor de campo magnético e v é o vetor velocidade da carga q .

O produto vetorial indica que a força tem uma direção mutuamente perpendicular ao fluxo de corrente e ao campo magnético. Entretanto, ao depararmos com um fluxo de corrente de um material exposto a um campo magnético perpendicular, o ângulo do fluxo da corrente alterado pelo campo magnético é chamado de ângulo Hall, sendo que este ângulo é intrínseco ao material, o qual é determinado pela mobilidade dos elétrons que determinam o coeficiente Hall (Hasanusta, et al., 2016). Neste caso, as linhas equipotenciais ao longo do comprimento do material são inclinadas, e isso nos leva a tensão de Hall medida ao longo do material, ou seja, tem-se uma tensão proporcional ao campo magnético aplicado (Matos & Lima 2022).

Utilizando o que foi proposto por Ribeiro, et al., (2021) é possível equacionar a teoria do funcionamento do sensor Hall, tem-se a Equação 2 para determinar a tensão Hall:

$$V_{HALL} = \left(\frac{RH}{d}\right) * i * B \quad (2)$$

Onde d é a espessura do material, i é o módulo corrente conduzida, B é o módulo do campo magnético aplicado, RH é a constante Hall do material e V_{HALL} a tensão Hall.

1.3 Calibração

Calibração é o ato de comparar os valores fornecidos por padrões ou por normas regulamentadoras, sob condições especificadas, conhecidos como valores verdadeiros (VV), com os valores medidos (VM), obtidos por meio de medições realizadas conforme as condições especificadas (Costa Neto, et al., 2021). Curvas de calibração analíticas são modelos matemáticos utilizados para converter sinais analíticos em concentrações. Geralmente são construídas por meio de regressão numérica pelo método dos mínimos quadrados (MMQ), gerando tanto modelos lineares quanto não lineares (Zucchini, 2018). Os instrumentos de medição sofrem com deterioração ao longo do tempo e com o uso; a partir disso erros sistêmicos passam a estar associados nas medições e podem interferir nos processos realizados pelo equipamento. A correção dos desvios que aparecerão nas medições garante a precisão das medições (Barbosa, 2018).

1.4 Automação e Controle

A busca pela automação constitui uma importante ferramenta de gestão e controle de processos; para implementação de uma ação de controle faz-se necessário o trio fundamental da automação: o sensor, o controlador e atuador. Ações de controle mais simples podem ser obtidas com uso de um simples microcontrolador (Barbosa et al., 2018).

Toda tecnologia pode ser utilizada na construção de um produto de baixo custo utilizando o microcontrolador Arduino, o qual permite que a placa seja interligada aos dispositivos automatizados (De Camargos et al., 2022). Arduino IDE é o software oficial do Arduino. O IDE possui código aberto e é utilizado para escrever e compilar códigos na placa de Arduino (Fezari & Al Dahoud 2018).

O LabVIEW é uma linguagem de programação gráfica feita pela empresa National Instruments. Ele é a base da construção que facilita a implementação do projeto devido a sua natureza intuitiva a qual é baseada em blocos gráficos (Sales, et al., 2021).

1.5 Destilação

As variáveis mais trabalhadas em uma coluna de destilação são temperatura, pressão, nível, vazão e composição. Dentre essas, uma das principais variáveis que afetam a operação de uma coluna é a vazão da carga, já que um distúrbio nessa

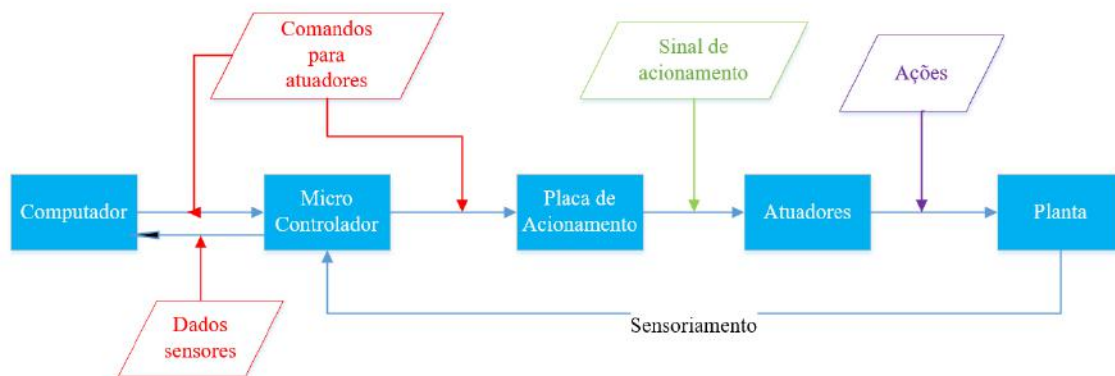
vazão de entrada pode afetar a dinâmica entre a entrada da carga e seu efeito no topo e no fundo da coluna (Santos, 2019).

Este trabalho tem como objetivo garantir o processo de automação, controle e calibração de instrumento de medição de vazão em planta experimental de destilação. O supervisório desenvolvido é capaz de mostrar dados do fluxo do fluido que entra no destilador de forma que tenhamos a condição de identificar a razão de alimentação que estará no momento de equilíbrio. Estes dados são vitais para monitoramento do processo, uma vez que a identificação da vazão no momento de equilíbrio permitirá avanços no estudo da otimização da planta para obtenção das melhores condições de destilação (Neto et al., 2022).

2. Metodologia

Neste projeto foi realizado um estudo laboratorial utilizando um Arduino do tipo UNO com microcontrolador Atmega328, com 14 pinos digitais e 6 analógicos. A programação foi realizada via LabView em computador localizado no laboratório de engenharia química da Universidade Católica de Pernambuco, o fluxo de dados seguiu conforme esquema da Figura 1.

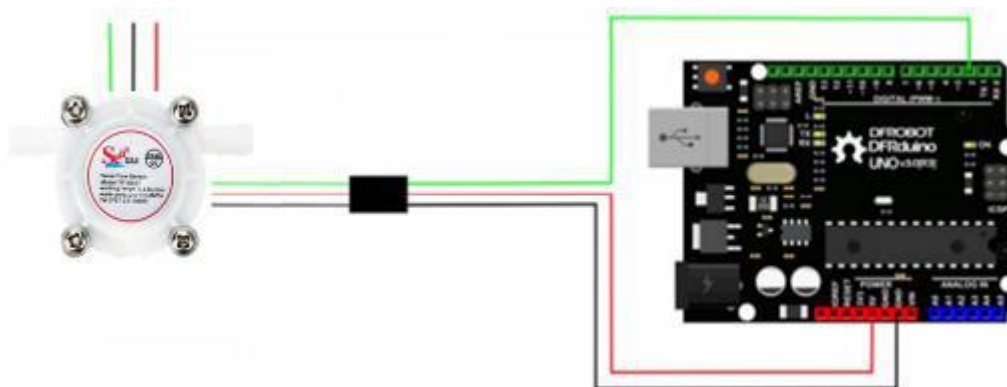
Figura 1- Funcionamento do fluxo de dados.



Fonte: Autores (2022).

O sensor de vazão utilizado é do modelo YF-S401, ele consiste num corpo de plástico, com rotor de fluxo e um sensor de efeito Hall. Quando o fluido passa através do sensor de vazão faz com que o rotor magnético rotacione e essa taxa de rotação estará diretamente ligada a vazão do fluido. A partir desse momento o sensor de efeito Hall emitirá um pulso com o sinal de saída para o Arduino. Esse funcionamento pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 - Sensor de Vazão conectado ao Arduino .



Fonte: Autores (2022).

Como especificações tem-se:

- Diâmetro interno: 4 mm;
- Diâmetro externo: 7 mm;
- Pressão da Água de Prova: <0,8 Mpa;
- Faixa de tensão: 5 ~ 12 V;
- Corrente de operação: 15 mA (DC 5V);
- Resistência de isolamento:> 100 MΩ;
- Precisão: ± 5% (0,3-3L / min);
- Pulso de saída de alta:> 4,5 VCC (tensão de entrada CC 5 V);
- Pulso de saída de baixa: <0,5 VCC (tensão de entrada CC 5 V);
- Taxa de dever de pulso de saída: 50% ± 10%;
- Fórmula de fluxo de água: 1L = 5.880 ondas quadradas;
- Faixa de umidade de trabalho: 35% ~ 90%;
- Dimensão: 58 * 35 * 26 mm / 2,28 * 1,37 * 1,02 polegadas;
- Peso: 30g.

Baseando-se na metodologia utilizado por Horigoshi e Costa (2016) foi criado um programa no IDE do Arduino de forma a fazer a contagem dos pulsos permitindo assim visualizar a vazão que o medidor indicava, para tal seguindo Delmée (2003) foi calculado o coeficiente K do medidor de vazão fazendo um experimento inicial onde o serial do IDE (utilizando um Arduino UNO) indicou o número de pulsos (26) e com uma vazão ajustada (manualmente) na faixa de 0,3 L/min (indicado pelo serial), medindo a vazão real com o auxílio de uma proveta de 500 mL deixando a vazão pré-definida preencher com o auxílio de uma mangueira a proveta durante 1 minuto (afim de se ter a quantidade de litros por minuto). Ao final deste teste inicial foi registrada a vazão de 0,32 L/min e através da relação da Equação 1 obteve-se o K de 81,25.

Com o coeficiente definido para o medidor (modelo Yf-S401) foram escolhidas cinco vazões, iniciando em 0,25 L/min (valor próximo à faixa mínima de operação do medidor de 0,3 L/min fornecida pelo Datasheet do mesmo) até 1,25 L/min (valor próximo á faixa máxima de operação do sistema de água utilizado de 1,30 L/min) com intervalos de 0,25 L/min. Para cada faixa o experimento foi repetido 5 vezes (na primeira faixa de vazão a proveta utilizada foi de 500 mL, para as faixas de 0,5 L até 1 L foi utilizada uma proveta de 1 L e para a faixa final usou-se uma proveta de 2 L). Ao final de todas as medições os valores foram registrados de forma a calcular a vazão média indicada pelo medidor, à vazão real média e

calculado o erro médio para cada faixa de vazão utilizada (A equação do erro pode ser visualizada na Equação 3) de forma a analisar tais dados com recursos gráficos obtendo uma resposta de superfície (com o auxílio do software STATISTICA 10) e a curva de calibração do medidor podendo assim obter a correlação dos dados e a equação da reta.

$$E = \frac{|Q_m - Q_r|}{Q_r} \quad (3)$$

Onde Q_m é a vazão medida pelo medidor em L/min, Q_r é a vazão medida com o auxílio da proveta em L/min e E o erro médio.

Com o intuito de melhorar a calibração o mesmo experimento foi realizado desta vez utilizando um sistema controlado de vazão (através do software Labview) por uso de inversor, de forma a mitigar possíveis erros manuais no experimento. Com o auxílio do IDE e do Labview foi criado um VI (Virtual Instrument) combinando o Labview/LINX (para enviar o comando através do Arduino controlando assim o inversor) e importando o programa do IDE (para medição de vazão) com o auxílio da ferramenta VISA (Virtual Instrument Software Architecture) combinando assim LINX e VISA.

Para este segundo experimento, também foi realizado um experimento inicial para encontrar o K (foi necessário recalculá-lo devido ao uso do medidor de frequência que é uma nova variável no processo); seguido o mesmo procedimento do experimento anterior encontrou-se 59 pulsos com vazão de 0,745 L/min obtendo assim um K de 79,19463. Para a próxima etapa foram utilizadas cinco faixas de vazão de 0,6 L até 1,2 L com intervalos de 0,15 L entre as faixas. Foram realizadas quatro medidas para cada faixa e mais uma vez anotando os valores médios de vazão medida, vazão real e erro médio com um adicional desta vez de se fazer o registro da frequência indicada pelo inversor, indicada no Labview/LINX de forma a também obter a equação dessa relação possibilitando uma melhor análise para calibração do medidor. Aqui também foi obtida uma relação entre a frequência do inversor e a vazão, do pulso em relação à frequência do inversor e a resposta de superfície (auxiliado pelo software STATISTICA 10) para a relação entre frequência, pulso e vazão.

3. Resultados e Discussão

Inicialmente foi realizada a calibração para o experimento manual, obtendo os valores da vazão real média, da vazão medida média e do erro médio (em porcentagem) como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1- Resultados Obtidos do Experimento Manual.

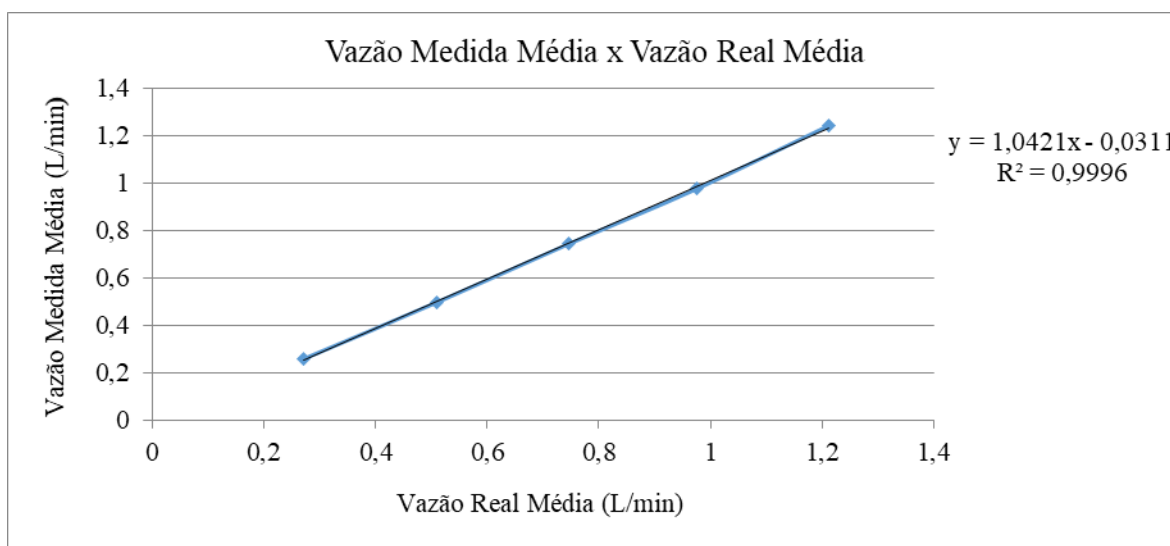
Faixa de Operação (L/min)	Vazão Medida Média (L/min)	Vazão Real Média (L/min)	Erro (%)
0,250	0,258	0,271	4,756
0,500	0,498	0,511	2,540
0,750	0,744	0,747	0,401
1,000	0,976	0,976	0,000
1,250	1,242	1,212	1,978

Fonte: Autores (2022).

Como pode ser observado na Tabela 1, o valor abaixo da faixa de operação mínima do medidor (0,250 L/min) apresenta um erro maior do que os demais, porém ainda aceitável para uma precisão de 95%. Destaca-se que ao atingir a faixa de 1,000 L/min o erro chega a ser nulo, demonstrando desta forma que o programa criado para medição do efeito Hall tem um funcionamento próximo a perfeição para os valores com os quais a linha de vazão onde foi realizado o experimento trabalha. Mesmo no último dado (que está a 0,050 L/min da vazão máxima de operação) o valor do erro não atinge 2% o que mostra não só que há um pico de medição (1,000 L/min) como uma resposta coerente ao que o programa do medidor se propõe a fazer.

Utilizando os valores da Tabela 1 foi plotado um gráfico de forma a demonstrar a curva de calibração do medidor e definir a equação da reta, obtendo também a correlação entre os dados, como pode ser visto na Figura 3.

Figura 3- Gráfico da Curva de Calibração do Experimento Manual.

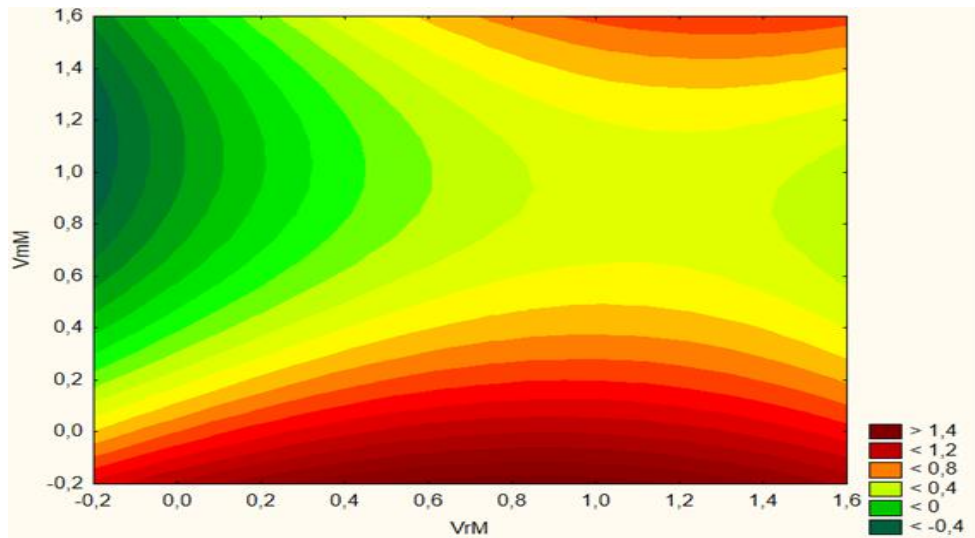


Fonte: Autores (2022).

Observando a Figura 3, pode-se perceber que a linha de tendência e a curva obtida se sobrepõem, demonstrando valores praticamente iguais, isso fica ainda mais evidenciado ao observar que a correlação obtida foi de 0,9996 um valor que se aproxima do que seria a correlação perfeita, demonstrando a eficácia do programa criado para medição. Ainda é possível obter a equação da reta: $y = 1,0421x - 0,0311$.

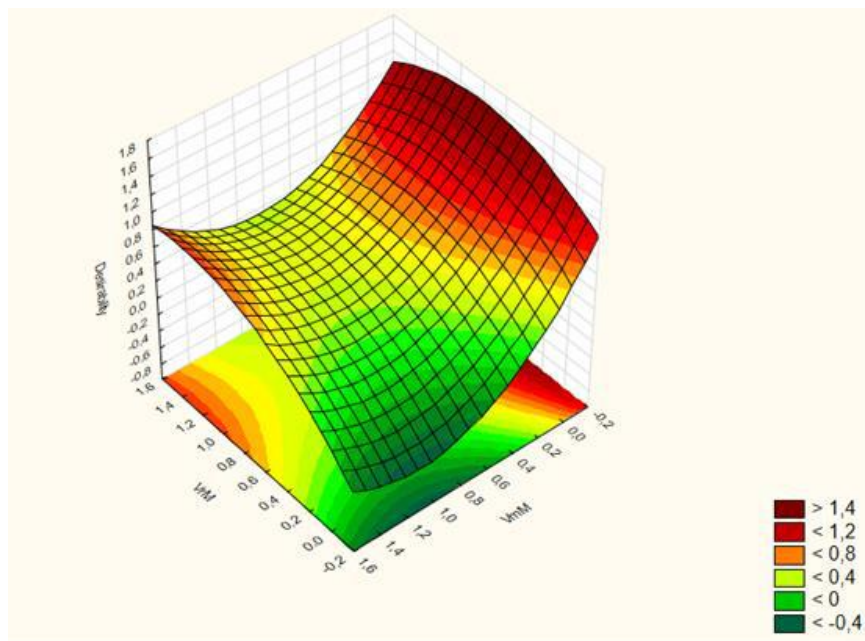
Após a plotagem do gráfico a fim de demonstrar o resultado de uma forma mais evidenciada graficamente, utilizaram-se os dados no STATISCA 10, obtendo respostas de superfície em 2D e 3D que podem ser vistas nas Figuras 4 e 5, respectivamente. Em que V_{mM} representa a vazão medida média e V_{rM} a vazão real média e a terceira variável o erro calculado entre os dois fatores.

Figura 4 – Resposta de Superfície 2D do Experimento Manual.



Fonte: Autores (2022).

Figura 5 – Resposta de Superfície 3D do Experimento Manual.



Fonte: Autores (2022).

É possível notar na Figura 4 onde os níveis nas bordas da resposta de superfície se encontram no seu ponto máximo e ao se aproximar do centro tende ao mínimo. Uma resposta coerente aos dados obtidos, pois na faixa inicial do experimento o erro apresenta um valor elevado em relação aos outros, e quanto mais à vazão cresce mais o erro tende (e atinge) o valor mínimo (zero), após este valor mínimo volta-se a ter uma elevação no erro devido à faixa de operação final ser próximo do máximo do sistema de vazão.

Na Figura 5 pode se ver o comportamento da resposta de superfície 3D com uma inclinação a se dobrar para uma resposta de ponto mínimo, como aqui a resposta seria uma indicação do erro entre os valores a tendência ao ponto mínimo é natural. Destaca-se que inicialmente a figura inicia em um valor máximo (justificado pelo valor de erro inicial fora da faixa

mínima de operação) e passa a se inclinar para baixo voltando a ter uma subida em sua dobra, essa reposta pode ser entendida como a diminuição do erro ao atingir o valor nulo e após isso voltar a crescer. Vendo a resposta de superfície 3D podemos entender que com mais valores em intervalo menores a tendência seria o comportamento característico de um ponto mínimo, destaca-se quando valores da vazão medida e da vazão real se igualaram só houve mais um dado o que influencia diretamente no comportamento da borda final da superfície.

Para o experimento com o auxílio da automação foram obtidos os valores das variáveis relevantes para o processo, dessa vez incluindo o pulso e a frequência média do inversor para cada faixa de vazão. Estes dados podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2- Resultados Obtidos do Experimento Automatizado.

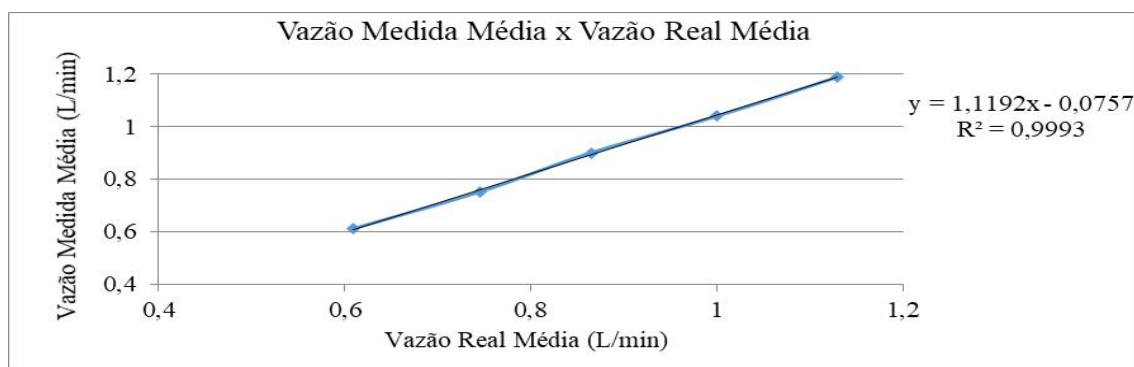
Faixa de Vazão (L/min)	Vazão Medida Média (L/min)	Vazão Real Média (L/min)	Erro (%)	Pulsos (por minuto)	Frequência (Hz)
0,600	0,610	0,610	0,000	48	16,05
0,750	0,750	0,745	0,667	59	17,65
0,900	0,900	0,865	3,889	71	19,35
1,050	1,040	1,000	3,846	82	20,85
1,200	1,190	1,130	5,042	94	22,65

Fonte: Autores (2022).

Como observado na Tabela 2 os erros entre a vazão real e a vazão medida estão maiores em comparação com os do experimento manual, isto se deve á influência do inversor no processo. Com o acréscimo do inversor se torna necessário estabelecer uma correlação não apenas baseada no pulso e na vazão, mas levando agora em consideração a frequência do inversor que controla a faixa de vazão.

Para efeito comparativo utilizando os dados da Tabela 2 foi plotado um gráfico da correlação entre a vazão medida média e a vazão rela média, a fim de ser ter uma nova equação da curva de calibração, evidenciando isso na Figura 6.

Figura 6- Gráfico da Curva de Calibração do Experimento Automatizado.

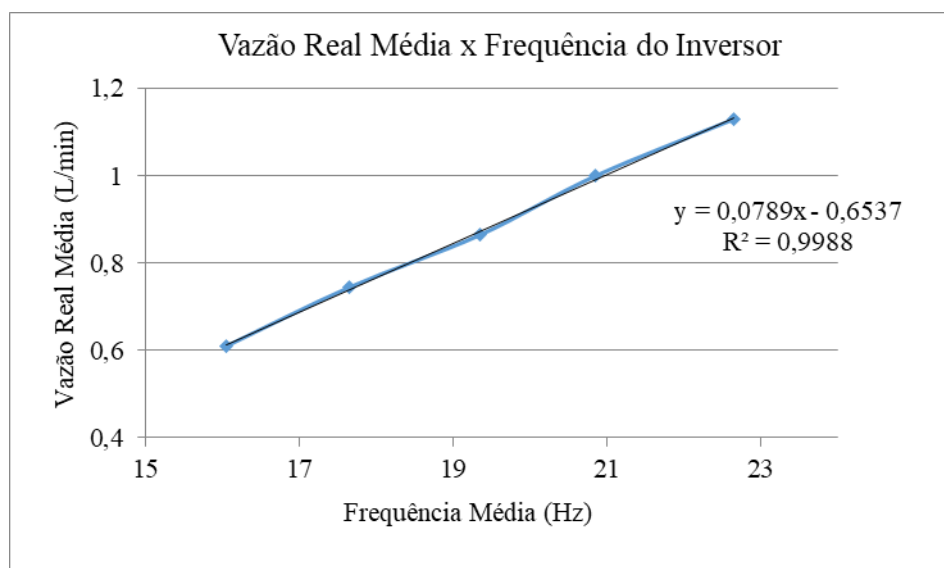


Fonte: Autores (2022).

Observando a Figura 6, pode-se perceber que a linha de tendência e a curva obtida se sobrepõem, demonstrando valores praticamente iguais, isso fica ainda mais evidenciado ao observar que a correlação obtida foi de 0,9993 um valor que se aproxima do que seria a correlação perfeita, demonstrando a eficácia da integração entre LINX e VISA para medição. Ainda é possível obter a equação da reta: $y = 1,1192x - 0,0757$. Apesar do aumento dos erros em relação ao experimento manual ainda foi possível obter resultados satisfatórios na comparação das vazões.

Com a influência dos valores do inversor, tornou-se necessário observar a relação entre este novo parâmetro e a vazão real. Foi considerada a vazão real visto que para o estabelecimento da constante K utilizou-se o mesmo parâmetro visando uma aproximação maior com a realidade. A relação pode ser vista na Figura 7.

Figura 7 – Gráfico da Relação entre Vazão Real Média e Frequência Média do Inversor.

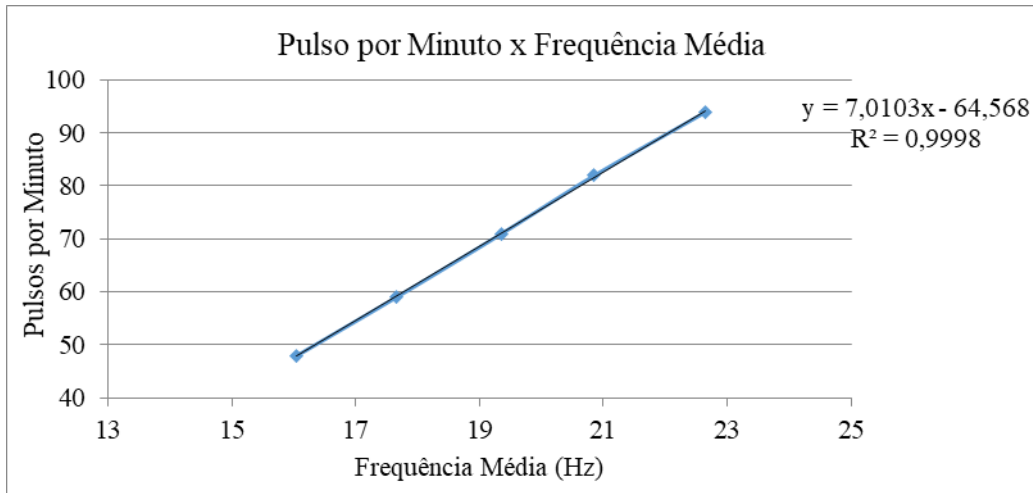


Fonte: Autores (2022).

Destaca-se na Figura 7 o alinhamento entre a linha de tendência e a curva obtida, ressaltada pela correlação de 0,9988. Com esta correlação pode-se afirmar que o programa utilizado se mostra eficiente na medição de vazão visto que o fator que afeta a medição do mesmo, beira a perfeição quando comparado com a variável dependente. Ainda é possível obter a equação da reta: $y = 0,0789x - 0,6537$.

Utilizando os parâmetros de pulso e frequência foi plotado um gráfico visando estabelecer a correlação entre as duas variáveis utilizadas para medir a vazão no processo, como mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Gráfico de Correlação entre Pulsos por minuto e Frequência Média.

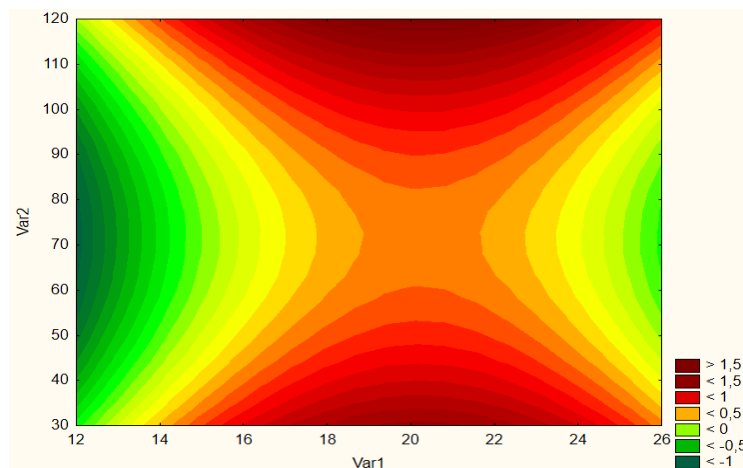


Fonte: Autores (2022).

Na Figura 8 observa-se que a correlação entre os fatores é praticamente 1, além da resposta gráfica de sobreposição entre a linha de tendência e a curva do gráfico. Ressalta-se ainda a equação da reta: $y = 7,0103x - 64,568$. Pode-se assim afirmar que a união entre LINX e VISA (onde cada um se encarregava da medição de um desses parâmetros de forma individual) mostra-se eficaz em chegar a variável dependente desejada (vazão).

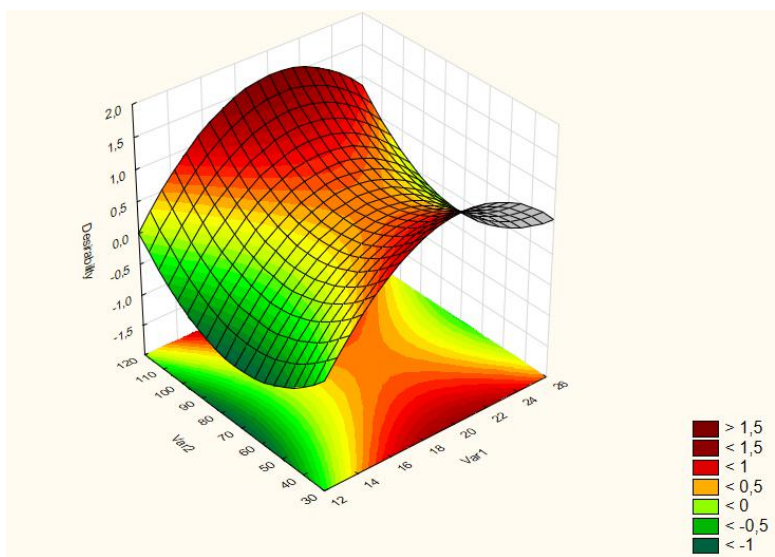
A fim de se obter uma resposta gráfica para evidenciar a correlação das variáveis independentes (frequência média e pulso) com a variável dependente (vazão real média) foram plotados dois gráficos de superfície de resposta (2D e 3D) com o auxílio do STATISTICA 10 como visto nas Figuras 9 e 10, onde Var1 representa a frequência média, Var2 representa os pulsos por minuto e a vazão real média é a variável dependente.

Figura 9 – Resposta de Superfície 2D do Experimento Automatizado.



Fonte: Autores (2022).

Figura 10 – Resposta de Superfície 3D do Experimento Automatizado.



Fonte: Autores (2022).

Na Figura 9 se observa uma superfície que tende a um comportamento de máximo, o que é de se esperar visto que com a interação das variáveis dependentes tende-se a uma maior eficácia em medir a vazão. Observa-se que a resposta aqui encontrada vai de encontro ao que foi visto nos gráficos de curva estabelecidos para este experimento. Uma das causas de não atingir o máximo se deve ao fato da quantidade de dados ser pequena, além de a primeira medida ter sido considerada perfeita por não apresentar erro em relação a vazão real.

Na Figura 10 apesar do gráfico ter uma inclinação para baixo sua legenda de cores reflete uma superfície que tende ao ponto máximo. Como destacado anteriormente o fato da quantidade de dados ser pequena e já partir do que se pode considerar o ponto ótimo de medida, o que afeta o gráfico visto que os valores anteriores se comportariam como um crescimento até o ponto em questão. Outro fator a se considerar é a proximidade do ponto final com a capacidade máxima de operação, o que acarreta em distorções (como mostrado na Tabela 2 o erro para este ponto ultrapassa 5% o que dificulta a leitura para os níveis de confiança de 95%).

Ainda que a resposta de superfície não se apresente de uma forma perfeita é possível notar sua tendência ao ponto máximo, o que é satisfatório para uma calibração inicial visto que a resposta de superfície (neste caso) teve como intenção mostra a interação entre as variáveis independentes do processo. Mesmo não obtendo a resposta perfeita o programa desenvolvido possibilita a correção dessa possível irregularidade através das equações de retas calculadas, é possível realizar o ajuste necessário.

4. Conclusão

Após os resultados obtidos no experimento manual conclui-se que a constante calculada (através do efeito Hall) permitiu uma medição apurada chegando a se equiparar com o valor real e apresentando uma correlação quase perfeita o que se permite dizer que a calibração do equipamento foi realizada.

No experimento automatizado, apesar de um dos dados ter ultrapassado os limites de confiança, as correlações obtidas e as respostas de superfície encontradas sugerem uma resposta eficaz da integração de LINX e VISA para a medição da vazão, desta forma confirma-se a calibração (devido ao fato do programa corrigir o erro utilizando as correlações).

Desta forma conclui-se que o programa desenvolvido em IDE e o VI utilizado foram capazes de efetuar a calibração (no caso do VI também foi possível realizar o controle) do medidor de vazão YF-S401.

Sugere-se para trabalhos futuros que outros tipos de sensores (temperatura, pressão entre outros) possam ser calibrados utilizando a metodologia empregada, calibrando tanto manualmente como utilizando o programa desenvolvido no IDE e o VI. Além disso o programa desenvolvido pode integrar um supervisor de coluna de destilação onde a vazão seja um dos parâmetros monitorados via automação e controle.

Referências

- Barbosa, C. C. (2018). Sistemas de medição de energia elétrica visando aplicação em identificação e prevenção de falhas.
- Barbosa, C. M. D., Rodrigues, C. V., Pettenon, D. A., & de Queiroz, T. M. (2018). Automação de um processo alternativo da pasteurização do leite utilizando ação de controle on-off. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, 10(1), páginas-41.
- Cavalcanti, G. O., & dos Santos, M. R. F. (2021). Parametrização Remota de Medidores de Vazão Eletromagnético. *Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada*, 6(4), 10-18.
- Chichanoski, G. (2018). *Desenvolvimento de instrumentação eletrônica com FPGA: vazão e temperatura* (Bachelor's thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná).
- Cosimato, B. (2022). Medidor de vazão eletromagnético: suas aplicações para soluções aquosas.
- Costa Neto, E., Lima, M. D., & Rolim, T. L. (2021). Calibração de hidrômetro para água fria de vazão nominal de 1, 5 m³/h. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 26, 793-803.
- De Camargos, A. F. P., dos Santos, C. R. B., da Silva, F. D., Kai, B. H. D., & Vieira, V. (2022). Produto educacional: automação residencial com uso de Arduino e IoT. *Research, Society and Development*, 11(6), e8311628882-e8311628882.
- Delmée, G. J. (2003). *Manual de medição de vazão*. Editora Blucher.
- Fezari, M., & Al Dahoud, A. (2018). Integrated development environment "IDE" for Arduino. *WSN applications*, 1-12.
- Hasanusta, K., Serteller, N. F. O., & Birbir, Y. (2016). The optimal hall sensor's position for brushless direct current machine: experimental study. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*, 39(1), 218-225.
- Horigoshi, F. M., & Costa, E. J. X. (2016). Uso de sensor efeito Hall para medição da vazão de fluidos no processo de produção de palatilizantes a base de proteína animal em escala piloto.
- Leong, W. Y., Soon, C. F., Wong, S. C., & Tee, K. S. (2016). Development of an electronic aerosol system for generating microcapsules. *Jurnal Teknologi*, 78(5-7).
- Matos, B. C. D. S., & Lima, M. C. D. (2022). Efeito Faraday: entre a atividade óptica natural e a teoria dos elétrons. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 44.
- Neto, L. R. P., de Mello, F. M., da Silva, A. M. B., Dias, M. C., Teixeira, E. P., & Zuffi, F. R. (2022). Controle avançado aplicado a colunas de destilação. *Brazilian Journal of Development*, 8(6), 44774-44780.
- Parra Sejas, M. Z. (2016). Desenvolvimento de uma bancada gravimétrica automática para calibração de medidores de vazão com diferentes fluidos.
- Ribeiro, L. H., Oliveira, A. F., & Rubinger, R. M. (2021). Instrumentação para medidas de mobilidade eletrônica e concentração de portadores em amostras semicondutoras, pelo método de van der Pauw. *Research, Society and Development*, 10(6), e41310615229-e41310615229.
- Sales, J. P., Ferreira, I. S., & Gross, M. A. (2021). Proposta de Automação do Observatório Astronômico Luiz Cruls. *Physicae Organum-Revista dos Estudantes de Física da UnB*, 7(2), 150-163.
- Santos, N. S. D. (2019). Simulação dinâmica de uma coluna de destilação.
- Sousa, D. F. M., de Negreiro Neto, L. G., de Lima, I. F., Oliveira, N. W. S., & da Fonseca, R. F. (2021). Laboratório de física moderna: análise do efeito hall através do cristal de germânio tipo positivo e tipo negativo Modern physics laboratory: hall effect analysis using positive and negative germanium crystal. *Brazilian Journal of Development*, 7(6), 54609-54622.
- Zucchini, R. R. (2018). Uma estimativa do efeito das incertezas dos padrões na incerteza das curvas de calibração em química analítica. *Revista IPT: Tecnologia e Inovação*, 2(7).