



**Ministério
da Educação**

Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Santa Catarina

**CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

CARLOS EDUARDO ORGECOSKI

SISTEMA DE VERIFICAÇÃO DE MEDIDORES DE GÁS

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 2022



**INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA**

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA

CÂMPUS FLORIANÓPOLIS

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA

BACHARELADO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA

CARLOS EDUARDO ORGECOSKI

SISTEMA DE VERIFICAÇÃO DE MEDIDORES DE GÁS

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica

Professor Orientador: Luciano Amaury dos Santos

Professor Coorientador: Francisco Édson Nogueira de Melo

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 2022.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Orgecoski, Carlos Eduardo

SISTEMA DE VERIFICAÇÃO DE MEDIDORES DE GÁS / Carlos Eduardo Orgecoski; orientação de Luciano Amaury dos Santos; coorientação de Francisco Edson Nogueira de Melo. - Florianópolis, SC, 2023.

67 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Mecatrônica. Departamento Acadêmico de Metal Mecânica. Inclui Referências.

1. Gas meters. 2. Flow sensors. 3. Verification system. I. Amaury dos Santos, Luciano . II. Edson Nogueira de Melo, Francisco . III. Instituto Federal de Santa Catarina. IV. **SISTEMA DE VERIFICAÇÃO DE MEDIDORES DE GÁS**.

SISTEMA DE VERIFICAÇÃO DE MEDIDORES DE GÁS

CARLOS EDUARDO ORGECOSKI

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 16 de dezembro de 2022.

Banca examinadora:



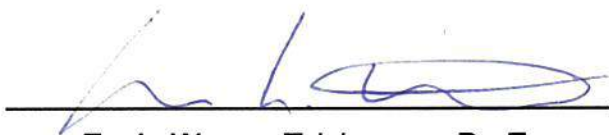
Luciano Amaury dos Santos, Dr. Eng.

IFSC



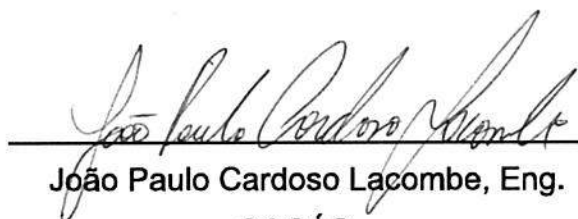
Francisco Édson N. de Melo, M. Eng.

IFSC



Erwin Werner Teichmann, Dr. Eng.

IFSC



João Paulo Cardoso Lacombe, Eng.

SCGÁS

O insucesso é apenas uma oportunidade,
para recomeçar com mais inteligência.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por ter me dado saúde para ir até o final. Agradeço a mim mesmo, por não ter desistido do meu sonho quando parecia impossível conquistá-lo. Agradeço à minha companheira Denise Machado por ter me entendido e me apoiado nessa trajetória final. Agradeço a minha família, que esteve sempre do meu lado e me deu todo o apoio necessário para ir até o fim deste objetivo. Ao professor Luciano, que aceitou ser orientador deste projeto e esteve sempre do meu lado, me desafiando e me ajudando. Ao professor Édson que conseguiu além de orientar na parte eletrônica do projeto, contribuir de forma decisiva com a comunicação e IHM, deste projeto, mas durante a graduação sempre foi um amigo, com o qual pude contar nos momentos de dúvidas acadêmicas. Aos meus amigos, que sempre estiveram do meu lado e entenderam minhas ausências e crises, e me ajudaram, me motivaram a ir até o final. A empresa SCGÁS, aos meus amigos de empresa em especial ao João Lacombe, por ter pegado junto na ideia do projeto e ter fornecido os medidores, e todos meus colegas de trabalho da General Eletric por terem me compreendido e me apoiado neste momento complicado. Agradeço também ao técnico de laboratório de Máquina Operatrizes, Charles, por ter me ajudado no projeto fornecendo um moto ventilador com seu inversor. E ao programa IFMAKER pelas impressões 3D feitas para o projeto. A todos os profissionais desta instituição que passaram pela minha jornada, em especial para Gregory (Redes) Francisco (Robótica), Nelso (Solda), Jeremias (Cálculo), Adriano Regis (Eletrônica Analógica), Valdir (Eletrônica Digital), Maurício Stivanello (Programação), Aurélio (Mecânica) sempre me desafiando e me instigando a ser um melhor engenheiro. E ao final ao professor- Vice Diretor Marcos Neves, por ter me auxiliado em toda graduação de forma a promover eventos acadêmicos de ponta como exemplo: nossa ida a Campinas- SP ao Laboratório de Luz Síncrotron, viagem de muito aprendizado e *Networking*.

Finalizo este projeto com sentimento de dever cumprido.

A todos vocês, o meu muito obrigado.

A educação é a arma mais poderosa
que você pode usar para mudar o mundo.
(Nelson Mandela)

RESUMO

Este projeto consiste em desenvolver um sistema para realizar a verificação da resposta em vazão de um medidor de gás, a um fluxo de ar. Existem três possibilidades, para uma verificação como esta: a mais usual, que é utilizar medidor de referência montado em série (no mesmo fluxo de ar) em que está o medidor a ser verificado; uma intermediária, que é a comparação da resposta do medidor a ser verificado com a resposta previamente observada, nas mesmas condições, de um sensor de referência com as mesmas características fluidodinâmicas (que causa a mesma perda de carga) e que não fica montado no sistema durante a verificação; e finalmente, a mais arriscada, que é comparar a vazão medida no medidor em teste com a prevista pela curva característica do ventilador (soprador) que gera o fluxo de ar. O sistema aqui desenvolvido explora as duas últimas possibilidades. O uso da resposta previamente observada com um medidor de referência com características fluidodinâmicas idênticas ao do medidor em teste revelou-se uma ótima opção. O uso da curva característica do ventilador permite fazer alguma verificação mesmo quando não se dispõe de um medidor de referência com as características fluidodinâmicas similares às do medidor em teste, porém com uma exatidão pouco satisfatória.

Palavras-Chave: Medidores de gás. Sensores de vazão. Sistema de verificação

ABSTRACT

This project consists of developing a system to verify the flow response of a gas meter to an air flow. There are three possibilities for a verification like this: the most usual, which is to use a reference meter mounted in series (in the same air flow) where the meter to be verified is located; an intermediate one, which is the comparison of the response of the meter to be verified with the previously observed response, under the same conditions, of a reference sensor with the same fluid dynamic characteristics (which causes the same pressure drop) and which is not mounted in the system during verification; and finally, the most risky one, which is to compare the flow measured with the meter under test with that predicted by the characteristic curve of the fan (blower) that generates the air flow. The system developed here explores the last two possibilities. The use of the response previously observed with a reference meter with fluid dynamic characteristics identical to the meter under test proved to be a great option. The use of the ventilator's characteristic curve allows some verification to be carried out even when a reference meter is not available with fluid dynamic characteristics similar to those of the meter under test, but with an unsatisfactory accuracy.

Keywords: Gas meters. Flow sensors. Verification system

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Pontos experimentais e curva ajustada àqueles correspondentes a frequências de rotação menores	22
Figura 2 - Usando para os pontos obtidos com maiores rotações o coeficiente de carga multiplicado por função do número de Reynolds.	24
Figura 3 - Usando para os pontos obtidos com maiores rotações uma variável dependente modificada, baseada no próprio coeficiente de carga, usando também o número de Reynolds, a frequência e o coeficiente de vazão.	25
Figura 4 - Moto-Ventilador	28
Figura 5 - Curvas características de moto-ventiladores parecidos com o utilizado	28
Figura 6 - Sistema do inversor	29
Figura 7 - Sensor de Pressão	31
Figura 8 - Medidor de Gás tipo Turbina - FMG	32
Figura 9 - Deslocamento positivo por lóbulos Rotativos	33
Figura 10 - Funcionamento turbina	35
Figura 11 - Esquemático de circuitos turbina	35
Figura 12 - Esquemático de localização dos cabos da turbina	36
Figura 13 - Sistema eletrônico	37
Figura 14 - Esquemático ULN2803	38
Figura 15 - Montagem em protoboard do Hardware	40
Figura 16 - Montagem em placa furada do Hardware	41
Figura 17 - Solda do Hardware na placa furada	42
Figura 18 - Fixação placa na caixa de proteção	43
Figura 19 - Solução em uma caixa finalizada	44
Figura 20 - Entrada de sinais elétricos	45
Figura 21 - Saída USB	46
Figura 22 - Arquivo de dados dos medidores e sensores	51
Figura 23 - Configuração alta frequência com ensaio interativo	52
Figura 24 - Ensaio Programado alta frequência	54
Figura 25 - Ensaio Programado baixa frequência	55
Figura 26 - Resultado	56
Figura 27 - Resultado	57

Figura 28 - Ensaio Interativo alta frequência	59
Figura 29 - Ensaio Interativo alta frequência - desaceleração	60
Figura 30 - Sistema Completo	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficientes do polinômio do terceiro grau ajustado aos dados experimentais	22
Tabela 2 - Comando de Frequência do Inversor	38

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.2 Objetivo geral.....	18
1.3 Objetivos específicos	18
2 PRINCIPAIS CONCEITOS	18
2.1 Vazão.....	19
2.2 Curva característica do ventilador	19
2.2.1 Leis das Bombas e dos Ventiladores.....	20
3 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA.....	27
3.1 Materiais e componentes utilizados.....	27
3.1.1 Ventilador	27
3.1.2 Inversor	29
3.1.3 Sensor de pressão	30
3.1.4 Trecho de tubo reto	31
3.1.5 Medidores de gás.....	31
3.1.5.1 Lóbulos Rotativos	32
3.1.5.2 Turbina.....	34
3.1.6 Hardware de comando do inversor e aquisição de dados.....	36
3.1.6.1 Comunicação com o Inversor de Frequência	37
3.1.6.2 Step Up	38
3.1.6.3 Montagem do circuito eletrônico	38
3.2 Desenvolvimento do Firmware	47
3.3 Desenvolvimento do Software	48
3.3 Sistema Completo	61
4 CONCLUSÃO.....	62

4.1 Recomendações.....	62
REFERÊNCIAS.....	64

1 INTRODUÇÃO

O gás natural é um combustível fóssil, na forma gasosa, contendo principalmente carbono e hidrogênio, ocorrendo em jazidas ou depósitos subterrâneos. Entre os hidrocarbonetos gasosos, o metano (CH_4) é o composto mais abundante. Esse combustível é responsável por quase 30% da energia consumida na Terra, sendo superado apenas pelo petróleo e pelo carvão. Em alguns países, como a Holanda, ele chega a representar 50% do suprimento energético. Segundo Monteiro (2010), a história do gás no Brasil começa no século XIX, na parte de iluminação a gás, onde em 1851 pelas mãos do Barão de Mauá é assinado o *tratado de iluminação a gás* para o Estado do Rio de Janeiro, surgindo assim a Companhia de Iluminação a Gás, mais tarde em 1997 a empresa se desmembra em 2 a CEG e a RioGas, para o interior do Estado. Já em São Paulo no ano de 1872, quando a empresa São Paulo Gas Company recebe autorização de prestação de serviço de distribuição de gás canalizado, a partir de 1942, com descoberta dos campos de Aratu e Itaparica (BA) o Gás Natural começa a ser comercializado no Brasil. Em 1962 iniciou-se a instalação da planta de gás natural em Catu, para obtenção do líquido de gás natural, e uma outra unidade na refinaria de Mataripe, com a mesma finalidade. As reservas brasileiras de gás natural triplicaram nos últimos dez anos, devido às descobertas decorrentes do primeiro "choque do petróleo", em 1973. No ano seguinte em 1974 a empresa São Paulo Gas Company tem a mudança de nome para COMGÁS. Em 1975, caracterizou-se pela consolidação do pólo petroquímico de Camaçari (BA) e pela descoberta de jazidas na plataforma continental de Sergipe, e em 1999 a empresa é comprada pela British Gas e Shell. Em 1997 a Petrobrás, através do acordo Bolívia-Brasil ([DECRETO No 2.142, DE 5 DE FEVEREIRO DE 1997.](#)) assinou contrato de compra e venda de gás natural a um volume de 4 Milhões m^3/dia e em 2008 a marca de 8.1 Milhões m^3/dia foi batida. Atualmente tem-se descoberto gás associado ao petróleo nos Estados do Rio de Janeiro, Rio Grande do Norte, Ceará e Espírito Santo, além de minas de gás natural na região do rio Juruá, no Amazonas. Os principais campos produtores de gás do país estão localizados nos Estados do Rio Grande do Norte, Ceará, Alagoas, Sergipe, Bahia, Espírito Santo e Rio de Janeiro. A utilização do gás natural obedece a uma escala de prioridades fixadas pelo Conselho Nacional do Petróleo, em função das necessidades do abastecimento nacional de derivados de empregado, de forma petróleo. O gás natural vem sendo empregado, de forma

prioritária, para estimular a produção de petróleo, através da reinjeção nos poços e posterior recuperação secundária. Em termos regulatórios, o Brasil está em uma posição de destaque em relação ao seu sistema integrado de normalização e regulamentação metrológicos denominado Sistema de Inovação em Qualidade e Metrologia-SINMETRO é um sistema brasileiro, constituído por entidades públicas e privadas, que exercem atividades relacionadas com metrologia, normalização, qualidade industrial e certificação da conformidade. (Venâncio, 2010). As especificações mínimas relacionadas ao tema estão contidas na Portaria nº 156, de 30 de março de 2022 do Instituto Nacional De Metrologia, Qualidade E Tecnologia – INMETRO (2022) e, em relação à certificação dos equipamentos, o Brasil possui a Rede Brasileira de Calibração-RBC para certificar as instituições de calibração.

O Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo-IPT realiza a certificação dos medidores para gases. Para a calibração inicial é necessário que o medidor esteja com a curva de aceitação e toda sua escala útil. Dado que o Regulamento de medição é bastante rigoroso no tocante aos prazos entre calibrações e condições de processo para as operações de calibração serem executadas (Ribeiro,2003). Caso não seja feita calibração periódica do equipamento, e seu funcionamento estiver fora das especificações mínimas dadas pela Portaria, a empresa estará sujeita a punições fiscais. Como todo equipamento de medição, é necessário tê-lo em uma faixa de erro tolerável de 2% para que se possa ter uma aproximação do resultado esperado, seguindo a Portaria 156 (INMETRO, 2022). Para que suas características se mantenham nas faixas ditas por essas portarias, as empresas acreditadas pela RBC/INMETRO, analisam o medidor a fim de comprovar a sua validade em termos legais para a empresa solicitante da calibração. O processo de calibração, inicia pelo traslado de um medidor para a empresa acreditada pela RBC/INMETRO, e termina, após a empresa ter calibrado o mesmo com o traslado de volta do medidor á empresa solicitante. Podem ocorrer, no meio do transporte, após a calibração, choques mecânicos, desequilíbrios térmicos e vibrações intensas. Como as tolerâncias dos medidores estão na casa do centésimo de milímetro, o mesmo pode perder suas qualidades atribuídas na calibração.

Um sistema de verificação, como o desenvolvido no presente trabalho, permite identificar este tipo de degradação de qualidades metrológicas para que sejam tomadas providências. O sistema foi desenvolvido para verificar medidores de lóbulos

rotativos e de turbina para vazões até 400 m³/h.

1.1 Justificativa

Existem sistemas comerciais de verificação de medidores de gás, como os oferecidos pela Dresser (2022), baseados no uso de um medidor de referência incorporado ao sistema e que fica em série com o medidor a verificar. Estes sistemas, entretanto, custam muito caro para as distribuidoras de gás que operam no mercado latino americano.

Outro método de verificação são os provadores (meter proovers), sendo que nos mais simples deles se injeta na rede uma esfera, que é empurrada pelo gás dentro da tubulação. Levando em conta o tempo que a esfera leva para percorrer um dado trajeto tem-se a vazão. Este método também é caro: toma de forma permanente um espaço considerável da instalação, tem uma operação demorada e envolve riscos importantes ao operar com o próprio gás natural nas pressões de trabalho típicas da instalação.

O presente trabalho vem, portanto, desenvolver tecnologia para a construção de sistemas de verificação de medidores de gás acessíveis para os distribuidores de gás em nosso país e mesmo outros países que enfrentam dificuldades econômicas parecidas.

1.2 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um sistema de verificação de medidores de gás compatível tanto com medidores de lóbulos rotativos quanto com medidores do tipo turbina para vazões até 400 m³/h.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para cumprir o objetivo geral, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- a) Conhecer a teoria necessária para o desenvolvimento do sistema;
- b) Projetar e construir a parte mecânica e eletrônica do sistema;
- c) Compatibilizar a bancada com software desenvolvido para sua operação e testar o funcionamento do conjunto.

2 PRINCIPAIS CONCEITOS

Para compreender o funcionamento do sistema ora proposto, é necessário o entendimento de alguns conceitos, não tão presentes no cotidiano da mecatrônica. E para isso foi escrito essa seção.

2.1 Vazão

É definida como sendo a quantidade em volume ($\forall$) que escoa através de certa secção em um intervalo de tempo $[t_i, t_f]$ considerado. A unidade volumétrica que usaremos neste trabalho será m^3/h

$$Q = \frac{\forall}{t_f - t_i}$$

O medidor de gás é usado fundamentalmente para indicar o volume de gás entregue ao cliente num certo período de tempo (um mês, de um modo geral). Como, entretanto, este volume é medido como a integral da vazão ao longo daquele período, medidores de gás são de fato medidores de vazão.

$$\forall = \int_{t_i}^{t_f} Q(t) dt$$

2.2 Curva característica do ventilador

Na seleção do ventilador, a primeira preocupação é garantir que ele alcance, 80% da vazão máxima dos medidores a testar.

Foi obtido por empréstimo um ventilador com características próximas às do modelo VCI 280 (IBRAM, 2022). No catálogo deste ventilador é fornecida apenas a curva característica para a frequência de corrente de alimentação de 60 Hz.

Para poder prever o comportamento em rotações correspondentes a outras frequências, recorre-se às leis de similaridade conhecidas como Leis dos Ventiladores, que serão discutidas na seção 2.2.1. Pode-se construir uma bancada de teste (verificação) de medidores de gás natural (daqui para a frente chamados apenas de **medidores**) sem usar nenhum sensor de pressão. Uma bancada assim precisa das duas uma: ou utilizar o chamado *master meter* (medidor calibrado de referência) conectado em série com o medidor sob verificação (ou seja, o *master meter* e o medidor em verificação são atravessados pela mesma vazão), ou utilizar um

ventilador (ou soprador) calibrado previamente com um *master meter* similar ao medidor que se deseja verificar. A palavra similar aqui é usada no sentido de ambos os medidores representarem a mesma obstrução do fluxo, ou seja, provocarem queda de pressão idêntica.

Entretanto pode ser vantajoso, em algumas situações, usando um único medidor (sensor de vazão) de referência que cubra a faixa de operação da bancada (apenas em laboratório, tipicamente uma vez por ano) e um sensor de pressão adequado (que fará parte da bancada, assim como o moto-ventilador), calibrar a bancada de modo que ela possa ser usada para verificar qualquer medidor cuja faixa de operação o moto-ventilador consiga varrer razoavelmente (as diferenças entre as obstruções que cada modelo de medidor representaria seriam captadas pelo sensor de pressão).

2.2.1 Leis das Bombas e dos Ventiladores

Embora o uso de inversores de frequência seja atualmente muito difundido (e recomendado para reduzir a vazão de ventiladores e bombas evitando o desperdício de energia e desgaste de peças associados ao uso de válvulas parcialmente fechadas) as curvas características de bombas e ventiladores centrífugos continuam sendo apresentadas da mesma forma que eram antes destes equipamentos se tornarem acessíveis. O que permite isto é essencialmente o uso dos princípios da Análise Dimensional e Similaridade (vide o Cap. 7 em Çengel e Cimbala, 2015). No caso das bombas, ventiladores e outras turbomáquinas que trabalham tipicamente sem interferências de efeitos de compressibilidade, dois parâmetros adimensionais (que se mantêm iguais em máquinas similares operando em pontos de funcionamento análogos), aparecem de modo inequívoco. O primeiro deles é o coeficiente de vazão

$$\phi = \frac{Q}{ND^3}$$

onde Q é a vazão (dada em m^3/s no SI), N é a frequência de rotação (em Hz) e D é o diâmetro do rotor da máquina (em m). O segundo é o coeficiente de carga

$$\psi = \frac{\Delta p}{\rho (ND)^2}$$

onde Δp é a diferença de pressão (em Pascal - Pa) entre a descarga e a sucção da máquina, ρ é a massa específica do ar (em kg/m³) e as demais variáveis já apareceram na definição do coeficiente de vazão. Além destes parâmetros também se define eventualmente outros, como o coeficiente de potência e a velocidade específica, que podem ser obtidos como combinações destes apresentados aqui (mas não é necessário abordar neste trabalho).

São chamadas de Leis dos Bombas e dos Ventiladores as relações obtidas entre as variáveis em duas máquinas e condições similares (nas quais estes parâmetros são iguais).

No presente trabalho, como a rotação do ventilador não foi medida diretamente, se utiliza no seu lugar a frequência da corrente alternada que alimenta o moto-ventilador.

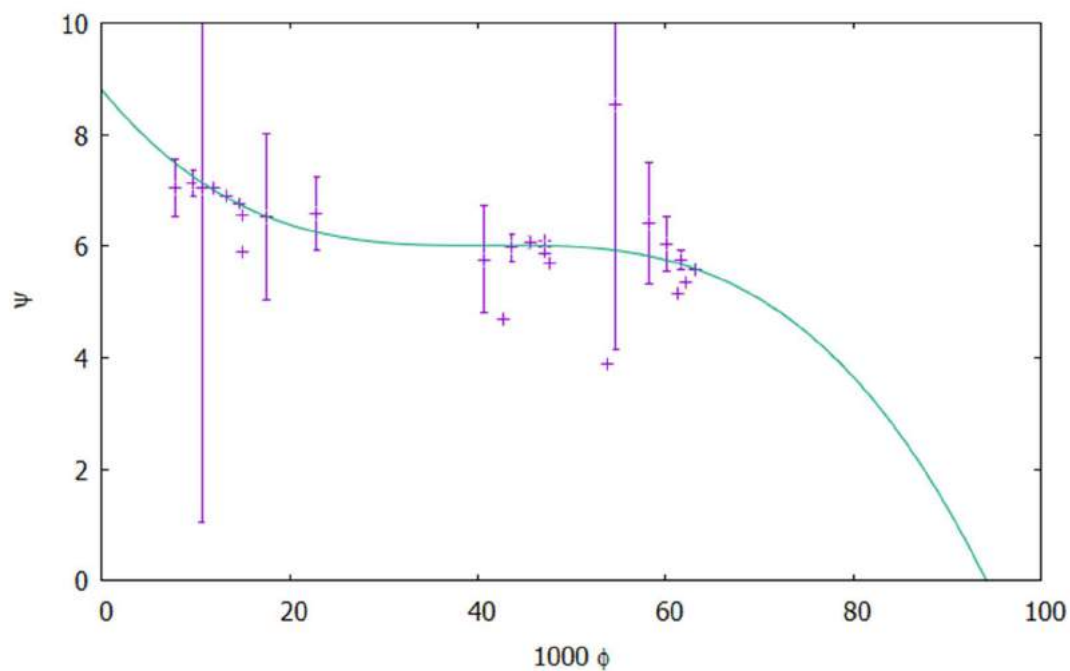
2.2.2 Desvios dos Resultados Experimentais (em relação a Curva Característica) por Efeito do Número de Reynolds de Máquina e da Frequência Nominal do Motor Elétrico

A Figura 1 mostra como medições feitas utilizando um ventilador trabalhando em diferentes rotações e sujeito a diversas diferenças de pressão entre descarga e sucção podem ser colocadas essencialmente sobre (dentro da incerteza indicada pelas barras de erro) uma única curva usando os parâmetros definidos na subseção anterior. A curva que aparece na Figura 1 é um polinômio

$$\psi = a_3 \phi^3 + a_2 \phi^2 + a_1 \phi + a_0$$

cujos coeficientes são dados na Tabela 1.

Figura 1 - Pontos experimentais e curva ajustada àqueles correspondentes a frequências de rotação menores



Fonte: Autoria própria (2022).

Tabela 1 - Coeficientes do polinômio do terceiro grau ajustado aos dados experimentais

coeficiente	a_3	a_2	a_1	a_0
valor	-40 373,4	4 976,22	-203,923	9,07398
incerteza %	19,00	18,94	16,78	3,622

Fonte: Autoria própria (2022).

Há nesta Figura 1 grupos de pontos, cada um deles obtidos com uma

determinada obstrução ao escoamento e diversas rotações. Nestes grupos nota-se que os pontos correspondentes às duas ou três frequências mais altas se afastam da curva (que foi ajustada aos pontos experimentais por mínimos quadrados ponderados com as incertezas) na direção de valores menores de coeficiente de carga ψ .

Este tipo de afastamento de um comportamento previsível até um certo ponto da curva é típico de uma mudança de padrão de escoamento determinado pela relação entre forças inerciais e viscosas expressa pelo número de Reynolds.

Embora se defina tradicionalmente o número de Reynolds em turbomáquinas usando a velocidade de rotação, no caso presente a mudança de comportamento ocorre em diferentes rotações e, portanto, parece mais adequado utilizar uma definição baseada em um valor aproximado da velocidade absoluta do fluido ao entrar no rotor, dada por

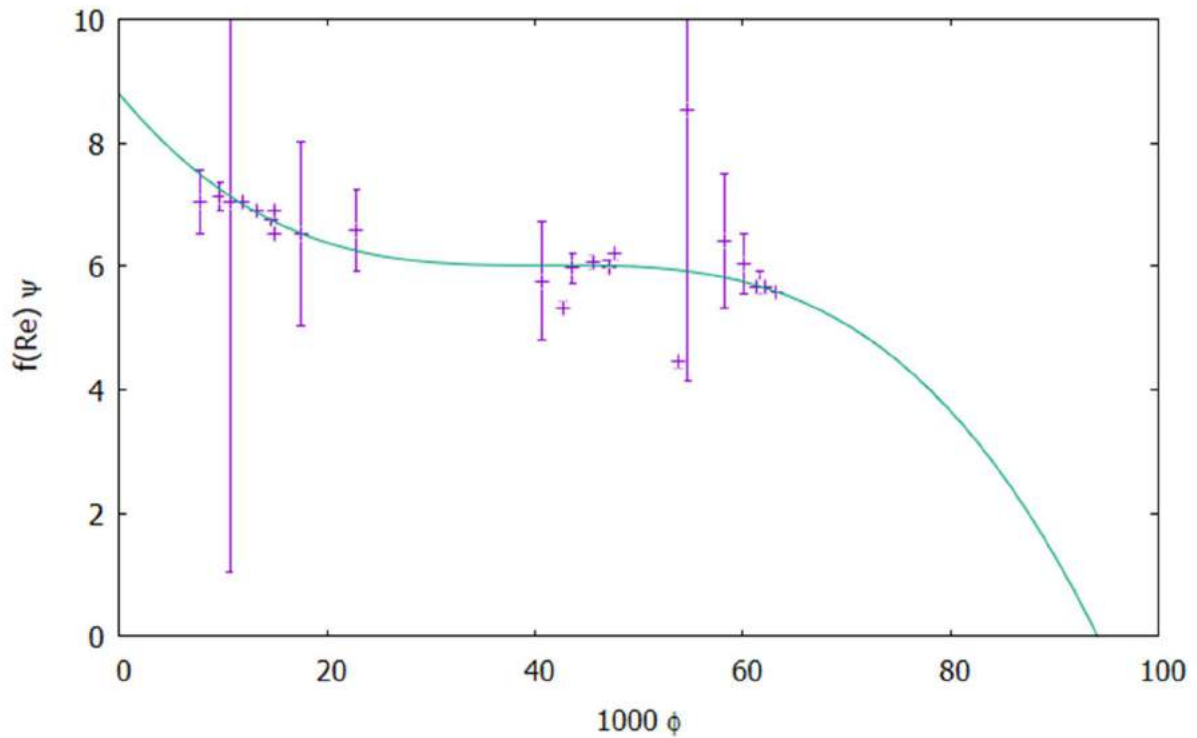
$$\begin{aligned} Re &= \frac{\rho D}{\mu} \sqrt{(\pi D_i N)^2 + \left(\frac{Q}{\pi D_i w} \right)^2} \\ &= \frac{\rho N D^2}{\mu} \sqrt{\left(\frac{\pi D_i}{D} \right)^2 + \left(\frac{\phi D^2}{\pi D_i w} \right)^2} \end{aligned}$$

onde D_i é o diâmetro da entrada do rotor, w é a largura do ventilador e μ é a viscosidade do ar. Para valores acima do valor $Re_c = 2,777 \times 10^5$, no qual os pontos começam a afastar-se da curva ajustada, se pode multiplicar o valor dos coeficientes de carga por uma função do número de Reynolds, usando uma nova variável dependente

$$f(Re) \psi = \psi \max \left[\left(\frac{Re}{Re_c} \right)^b, 1 \right]$$

onde $b = 0,2$. Isto permite uma redução no afastamento dos pontos em relação à curva ajustada, como se vê na Figura 2.

Figura 2 - Usando para os pontos obtidos com maiores rotações o coeficiente de carga multiplicado por função do número de Reynolds.



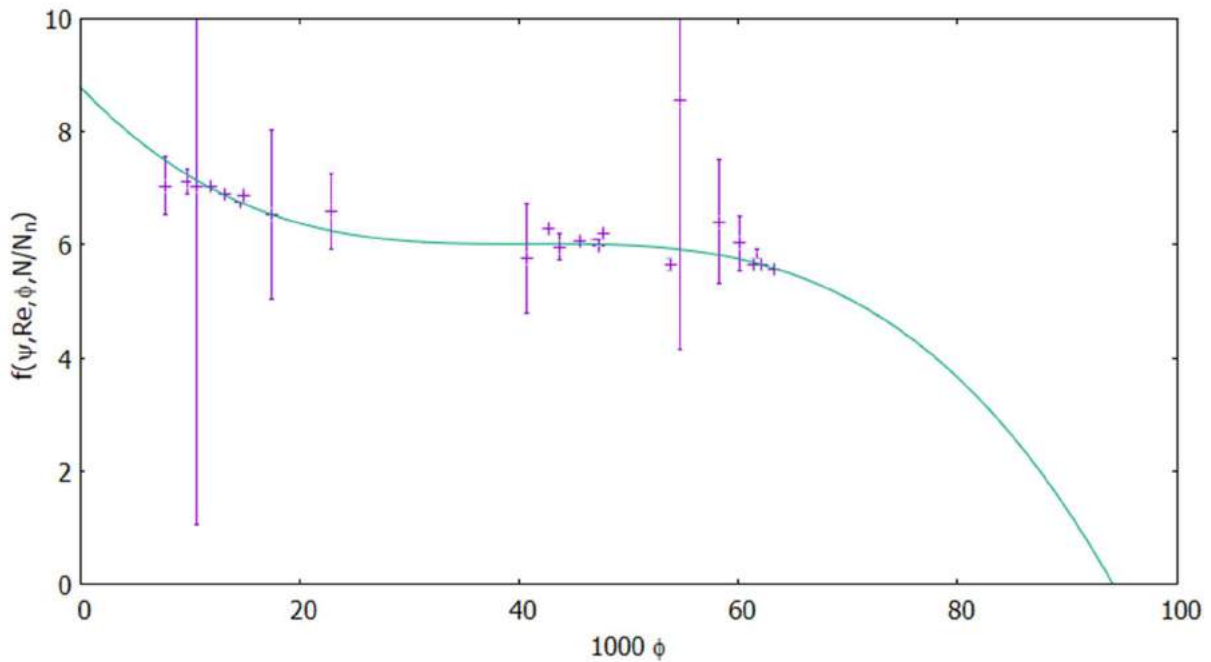
Fonte: Autoria própria (2022).

Restaram na Figura 2, entretanto três pontos nitidamente fora da curva ajustada e com distâncias que aumentam com o coeficiente de vazão, sendo que estes três pontos correspondem à frequência $N = 80$ Hz (33,3 % acima da frequência nominal $N_n = 60$ Hz do motor do moto-ventilador), o que provavelmente se explica pelo fato de o torque máximo do motor cair quando a frequência da corrente de alimentação fica acima da nominal (vide seção 6.4.3 do guia técnico). Para lidar com mais este efeito uma modificação adicional na variável dependente pode ser feita, por usando agora a rotação nominal do motor elétrico

$$f(\psi, Re, \phi, N/N_n) = \psi \max \left[\left(\frac{Re}{Re_c} \right)^b, 1 \right] + c \phi \frac{N}{N_n} \max \left(\frac{N - N_n}{N_n}, 0 \right)$$

onde se tem o coeficiente $c = 50$.

Figura 3 - Usando para os pontos obtidos com maiores rotações uma variável dependente modificada, baseada no próprio coeficiente de carga, usando também o número de Reynolds, a frequência e o coeficiente de vazão.



Fonte: Autoria própria (2022).

Com isto, para obter a vazão que o ventilador fornece a partir de valores conhecidos de frequência de corrente de alimentação e da pressão medida, é preciso resolver uma equação não linear

$$f(\psi, Re, \phi, N/N_n) = a_3 \phi^3 + a_2 \phi^2 + a_1 \phi + a_0$$

o que precisa ser feito por um método numérico iterativo. Colocando este problema em uma forma inclusive mais adequada para implementação no LabVIEW, pode-se tratá-lo como a busca das raízes reais de uma função não linear, ou seja, dos valores reais de ϕ que satisfazem

$$a_3 \phi^3 + a_2 \phi^2 + a_1 \phi + a_0 - c \phi \frac{N}{N_n} \max\left(\frac{N - N_n}{N_n}, 0\right) - \psi \max\left[\left(\frac{Re}{Re_c}\right)^b, 1\right] = 0$$

e então obter a vazão (ou as vazões possíveis, caso houvesse esta ambiguidade que não foi observada com o ventilador testado) utilizando

$$Q = D N \phi$$

É evidente, entretanto, que as equações ajustadas conforme se viu neste documento são apenas uma aproximação do comportamento do ventilador (não Leis da Física) e os desvios desta aproximação em relação à realidade são majorados por dois fatores:

- as características metrológicas do sensor de pressão utilizado no presente trabalho (que deixam muito a desejar);
- pequenas variações de pressão causam variações de vazão muito significativas, mantidas constantes as demais grandezas que influenciam esta vazão, este fato se traduz no fato de que, no intervalo $0,03 < \phi < 0,055$ tem-se aproximadamente

$$\frac{\partial \psi}{\partial \phi} \approx 0 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\partial \phi}{\partial \psi} \approx -\infty$$

Levando em conta o exposto acima, pode-se considerar satisfatório o fato de não terem sido observados desvios maiores que 17 % entre as medidas de vazão realizadas com o medidor de vazão do tipo turbina (sem nenhuma obstrução ao fluxo após ele) e os valores obtidos a partir da equação ajustada acima (tendo como dados medidas de pressão e as frequências de alimentação do moto-ventilador correspondentes às vazões medidas).

Como, entretanto, os desvios entre as medidas de vazão obtidas em ensaios repetidos com o mesmo medidor, alimentando o moto-ventilador com corrente elétrica de mesma frequência, são menores que 2%, é muito recomendável utilizar, como valores de vazão exatos, diretamente valores de vazão medidos com um medidor de gás de referência do mesmo modelo de medidor de gás em teste (e em condições de manutenção semelhantes, isto é crucial para os sensores de lóbulos rotativos que tem

um comportamento altamente dependente de sua lubrificação), sempre que tais valores estiverem disponíveis. A curva característica do ventilador, portanto, só seria utilizada quando o medidor de gás em teste for de um modelo do qual não houver um medidor de referência disponível (e mesmo nestes casos, o uso de dois medidores de modelos diferentes em série pode ser uma opção melhor).

3 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA

Esta seção descreve o desenvolvimento do sistema de hardware de controle de vazão e pressão. Foi desenvolvido *firmware* na plataforma Arduino e *software* na plataforma LabVIEW

3.1 Materiais e componentes utilizados

3.1.1 Ventilador

O moto-ventilador utilizado possui diâmetro de rotor de 280 mm, 66 mm de diâmetro interno do tubo de descarga do ventilador e diâmetro na sucção de 90 mm um motor elétrico trifásico W22 Plus, da WEG, de 2 pólos e 1 cv. Na Figura 5 são mostradas curvas características de moto-ventiladores que têm algumas das peculiaridades daquele que foi empregado no presente trabalho: também são feitos em alumínio fundido, usam motores de 1 ou 2 cv, e tem rotores com diâmetros entre 200 e 360 mm (com pás curvadas para trás).

Figura 4 - Moto-Ventilador



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 5 - Curvas características de moto-ventiladores parecidos com o utilizado



Fonte: IBRAM (2022)

As curvas características mostradas na Figura 4 são para motores de 2 pólos alimentados com corrente alternada na frequência de 60Hz e no presente trabalho

foram utilizados, além deste, outros 7 valores de frequência de alimentação, obtidos usando o inversor de frequência.

3.1.2 Inversor

Foi utilizado o inversor CFW10, especificamente o modelo CFW10040S2024PSZ (WEG, 2020), que tem entrada monofásica e saída trifásica em 220 V e corrente de saída de até 4 A de corrente máxima. Este inversor possui entradas digitais que possibilitam selecionar, dentre um conjunto de valores, a frequência da tensão de acionamento, e, portanto, a velocidade de rotação do moto-ventilador.

Figura 6 - Sistema do inversor



Fonte: Autoria própria (2022).

3.1.3 Sensor de pressão

Foi usado um sensor de pressão de baixo custo modelo MPS20N0040D, que tem uma série de limitações, conforme discutido por Hrisko (2020). Estas limitações estão ligadas à imprecisão de informações fornecidas na folha de dados pelo fabricante, às necessidades de: calibrar cada um dos sensores deste tipo que se adquire; e de, antes de cada ensaio que o emprega, fazer uma aquisição da sua medida correspondente à pressão atmosférica (uma tara) para corrigir a deriva instrumental.

A faixa de operação deste sensor vai de -10 a 10 kPa aproximadamente e ele usa um conversor A/D de 24 bits Hx710B.

Sensores deste tipo costumam apresentar incerteza de $\pm 5\%$. As variações máximas observadas entre leituras obedeceram esta estimativa, embora na proximidade da pressão manométrica nula problemas de histerese agreguem aproximadamente ± 10 Pa a esta incerteza.

Este sensor de pressão, de baixíssimo custo, voltado para o uso didático, permitiu determinar os coeficientes de perda de carga localizada, dos medidores de gás testados e fazer um modelo aproximado do comportamento do ventilador (pressão em função da vazão e frequência de corrente elétrica). Caso não se deseje utilizar um destes modelos de comportamento do ventilador para estimar a vazão, este sensor é desnecessário.

Para realizar a função deste sensor de forma mais eficiente recomenda-se um sensor de melhor qualidade, por exemplo o LFM108 produzido pela Lefoo (2022), que possui escritório no Brasil e atende regularmente o mercado de Automação de sistemas de climatização.

Figura 7 - Sensor de Pressão



Fonte: Autoria própria (2022).

3.1.4 Trecho de tubo reto

Para tornar o escoamento paralelo foi utilizado um trecho reto de tubo de PVC de 72 mm de diâmetro interno com comprimento de 1 m a partir da descarga do moto-ventilador. Isto é importante para se fazer uma medição de pressão estática numa região em que o escoamento está plenamente desenvolvido praticamente.

3.1.5 Medidores de gás

Medidores de gás possuem diversos métodos de operação, o trabalho se baseou em 2 modelos, um do tipo lóbulos rotativos G16 B3:8C175 (Dresser, 2021) e outro do tipo turbina DN 8, G 250 (FMG, 2022) mostrado na **Figura 8**. Abaixo se discutirá cada tipo de medidor e suas características.

Figura 8 - Medidor de Gás tipo Turbina - FMG

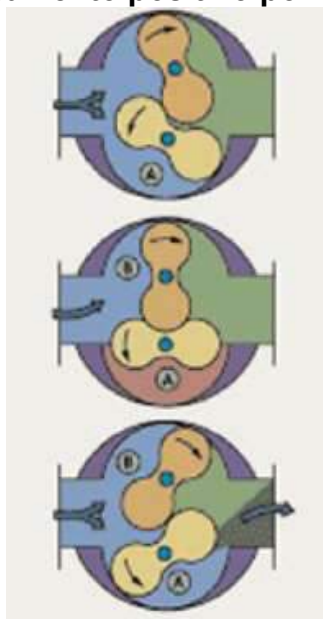


Fonte: Autoria própria (2022).

3.1.5.1 Lóbulos Rotativos

Estando o rotor na posição vertical em determinado volume de gás, ficará retido no compartimento de medição. Como o rotor gira devido à pequena diferença de pressão entre a entrada e saída, o volume medido do gás é descarregado na base do medidor. Essa ação sucede-se quatro vezes em uma movimentação completa com os rotores em deslocamentos opostos e a uma velocidade proporcional ao volume do gás deslocado, como mostrado na **Figura 9**.

Figura 9 - Deslocamento positivo por lóbulos Rotativos



Fonte: BUNETTI

O medidor Dresser B3:8C175 G16 (cuja faixa de operação está limitada a 25 m³/h) testado tinha um sensor eletrônico com $k = 0,1$ pulso/m³. Foi levantada para este medidor uma curva aproximada de coeficiente de perda de carga κ_{hl} que varia com o número de Reynolds baseado no diâmetro do trecho de tubo reto (72 mm) Re_{tubo}

$$\kappa_{hl} = 6 \times 10^4 Re_{\text{tubo}}^{-0,9}$$

onde

$$\kappa_{hl} = \frac{\pi \Delta P D_{\text{tubo}}^4}{8 \rho Q^2}$$

$$Re_{\text{tubo}} = \frac{4 \rho Q}{\pi \mu D_{\text{tubo}}}$$

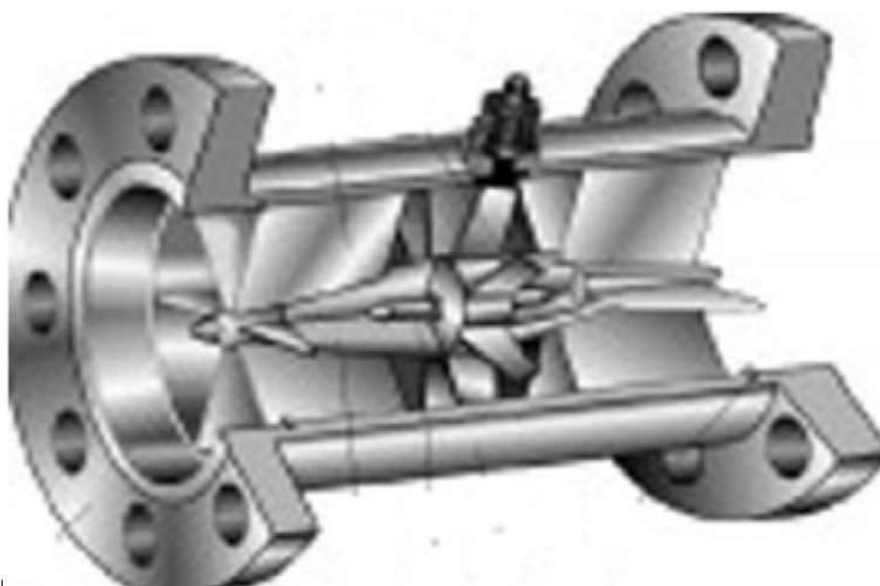
A queda de pressão Δp (e, portanto, o coeficiente calculado) é entre a tomada de pressão no final do trecho reto de tubo e a saída de ar do medidor para a atmosfera, o que de fato abrange a mudança de diâmetro entre o tubo reto e a entrada do medidor e a própria saída do medidor que não tinha nada conectado nela.

3.1.5.2 Turbina

Um medidor de vazão tipo turbina consiste basicamente em um rotor provido de palhetas, suspenso numa corrente de fluido com seu eixo de rotação paralelo à direção do fluxo. O rotor é acionado pela passagem de fluido sobre as palhetas em ângulo; a velocidade angular do rotor é proporcional à velocidade do fluido que, por sua vez, é proporcional à vazão do volume. Uma bobina sensora na parte externa do corpo do medidor detecta o movimento do rotor. Esta bobina é alimentada, produzindo um campo magnético. Como as palhetas do rotor são feitas de material ferroso, à medida que cada palheta passa em frente à bobina, corta o campo magnético e produz um pulso. O sinal de saída é uma sequência de pulsos de tensão, em que cada pulso representa um pequeno volume determinado do fluido. O sinal detectado é linear com a vazão. A equação do fator do medidor (k) se dá por:

$$k = \frac{n^{\circ} \text{ de pulsos}}{V}$$

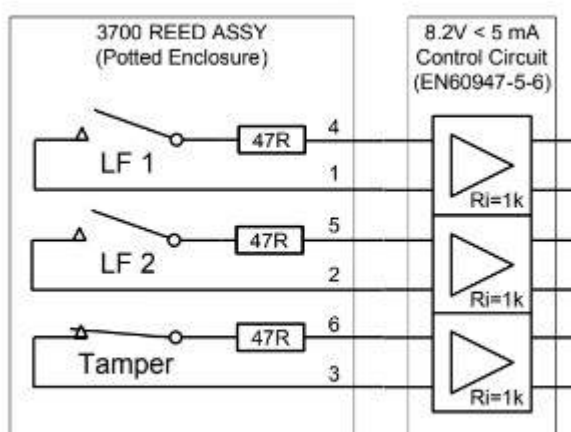
Figura 10 - Funcionamento turbina



Fonte: SILVER

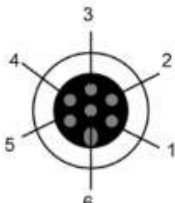
Para que fosse possível captar os pulsos dos medidores foram utilizados seus manuais os quais contém especificações dos circuitos de pulsação, abaixo esquemático de localização de posição de circuitos do medidor do tipo turbina. Sabendo que para alta frequência é utilizado padrão NAMUR (IEC 60947-5-6:1999) para sensores de proximidade.

Figura 11 - Esquemático de circuitos turbina



Fonte: FMG

Figura 12 - Esquemático de localização dos cabos da turbina

	Pin	Beschrijving	ATEX informatie
	1	Data transmissie signaal (+) NAMUR	Ex ib IIB T3
	2	Data transmissie signaal (-) NAMUR	Ui: 10V
	3	LF2 reed contact or SS1 (+)	Li: 63 mA
	4	LF1 reed contact or SS2 (-)	Pi: 157 mW
	5	LF1 reed contact or SS2 (+)	Ci: 18 nF
	6	LF2 reed contact or SS1 (-)	Li: 2,2 nH

Fonte: FMG

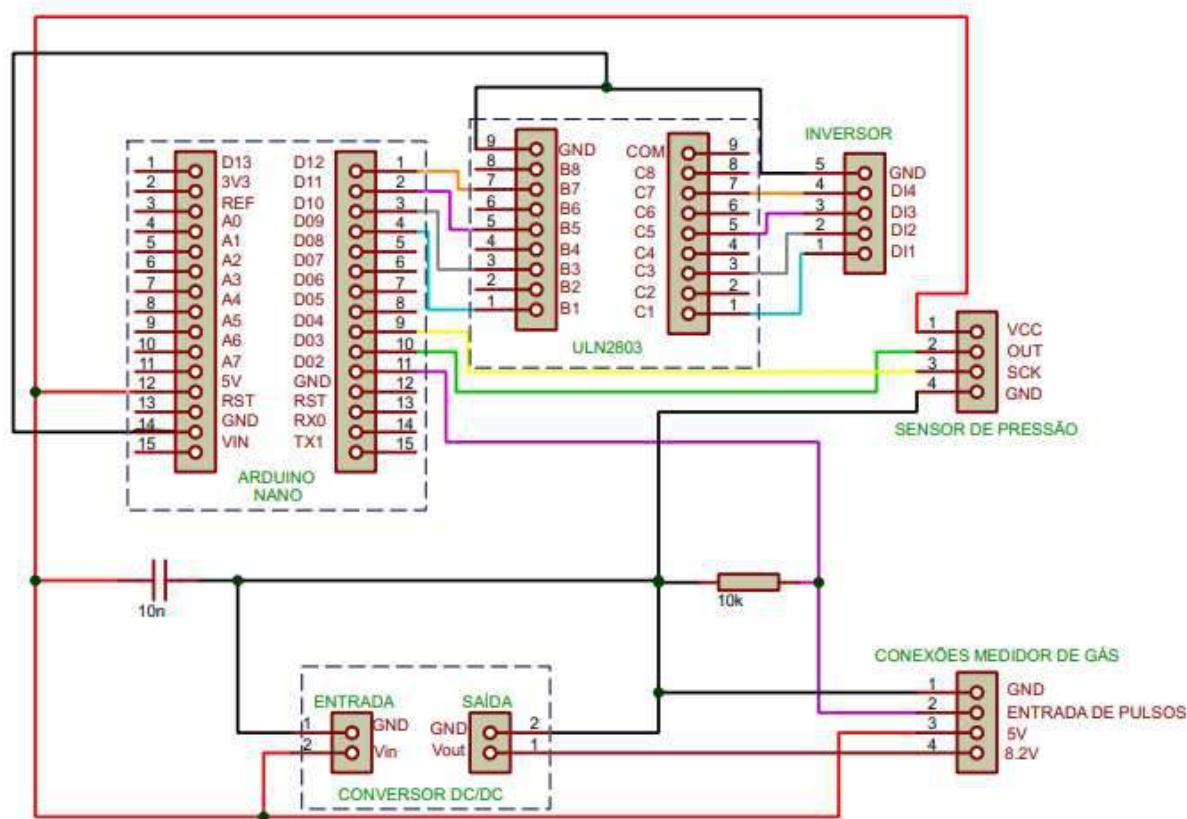
O medidor FMT-Lx DN 8" G250 (cuja faixa de operação vai a 400 m³/h) testado tinha indicado em placa, para o sensor NAMUR, o fator $k = 5320,502$ pulsos/m³ e para o sensor de palheta de contato $k = 1$ pulso/m³. Também foi levantada para este medidor uma curva aproximada de coeficiente de perda de carga K_{hl} que varia com o número de Reynolds baseado no diâmetro do trecho de tubo reto (72 mm) Re_{tubo}

$$\kappa_{hl} = 1,5 \times 10^2 Re_{tubo}^{-0,35}$$

3.1.6 Hardware de comando do inversor e aquisição de dados

Foi desenvolvido um equipamento eletrônico, baseado na plataforma Arduino Nano do sistema embarcado, para fazer o comando do inversor de frequência e aquisição de dados, conforme mostrado na **Figura 13**.

Figura 13 - Sistema eletrônico

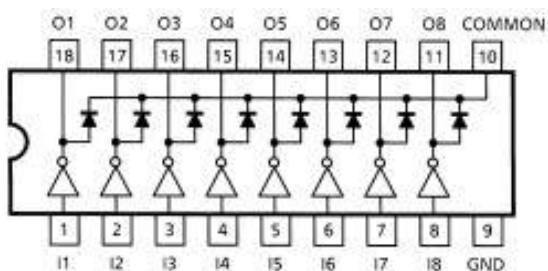


Fonte: Autoria própria (2022).

3.1.6.1 Comunicação com o Inversor de Frequência

Para comandar o inversor com o objetivo de fazer o controle da vazão em malha aberta, utilizaram-se três pinos do Arduino para emitir uma palavra de comando de três bits, que define a frequência do inversor, conforme definido na Tabela 2. Os terminais de entrada do inversor operam com sinais de níveis lógicos de 10V, enquanto o Arduino opera com níveis de 5V, e então foi necessário um circuito de adaptação. A solução adotada foi o uso do ULN2803 representado na **Figura 14**, um circuito integrado que contém “drivers” (reforçadores de corrente), alimentado em 10V pelo próprio inversor CFW10.

Figura 14 - Esquemático ULN2803



Fonte: TOSHIBA (2022)

Tabela 2 - Comando de Frequência do Inversor

Palavra de Comando	Frequência (Hz)
000	4
001	8
010	12
011	16
100	30
101	45
110	60
111	80

Fonte: Autoria própria (2022).

3.1.6.2 Módulo elevador de tensão DC-DC

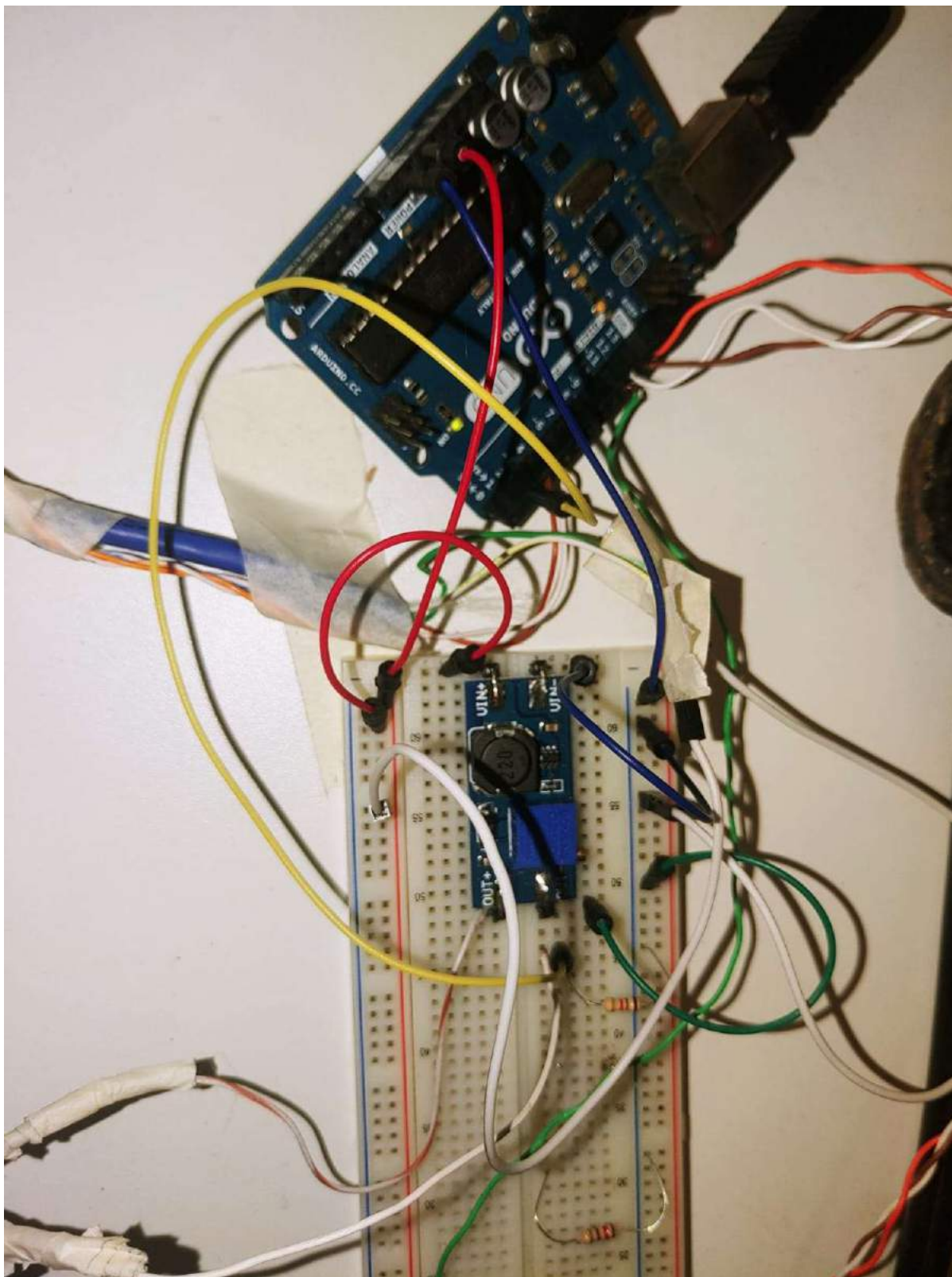
Foi utilizado um módulo elevador de tensão DC-DC MT3608 (Aerosemi, 2022), ajustado em 8,2 V para entregar a tensão requerida pelos sensores de alta frequência do padrão NAMUR NE 43.

3.1.6.3 Montagem do circuito eletrônico

Na **Figura 15** se mostra o processo de desenvolvimento com placa *protoboard*, na **Figura 16** se mostra o posicionamento para a fixação dos componentes em sua

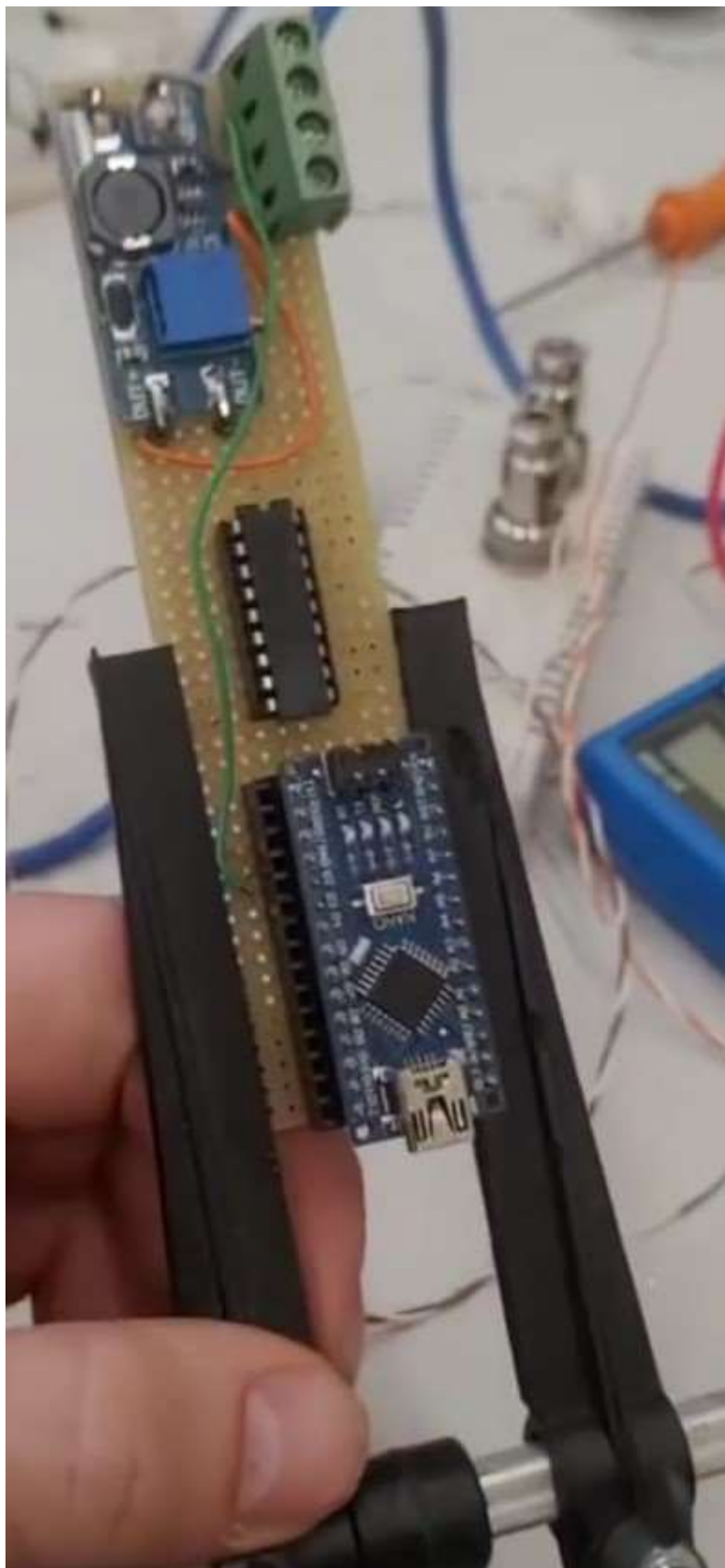
placa protótipo, na **Figura 17** se mostra as soldas feitas, na **Figura 18** se mostra caixa de proteção, na qual a placa e as conexões sensíveis dos cabos se encontram, na **Figura 19** se mostra a caixa finalizada, na **Figura 20** se mostra a entrada de sinais dos medidores a serem verificados, na **Figura 21** se mostra a entrada USB para conexão do sistema em um computador na qual foi seguido a filosofia “*One Box Solution*”.

Figura 15 - Montagem em protoboard do Hardware



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 16 - Montagem em placa furada do Hardware



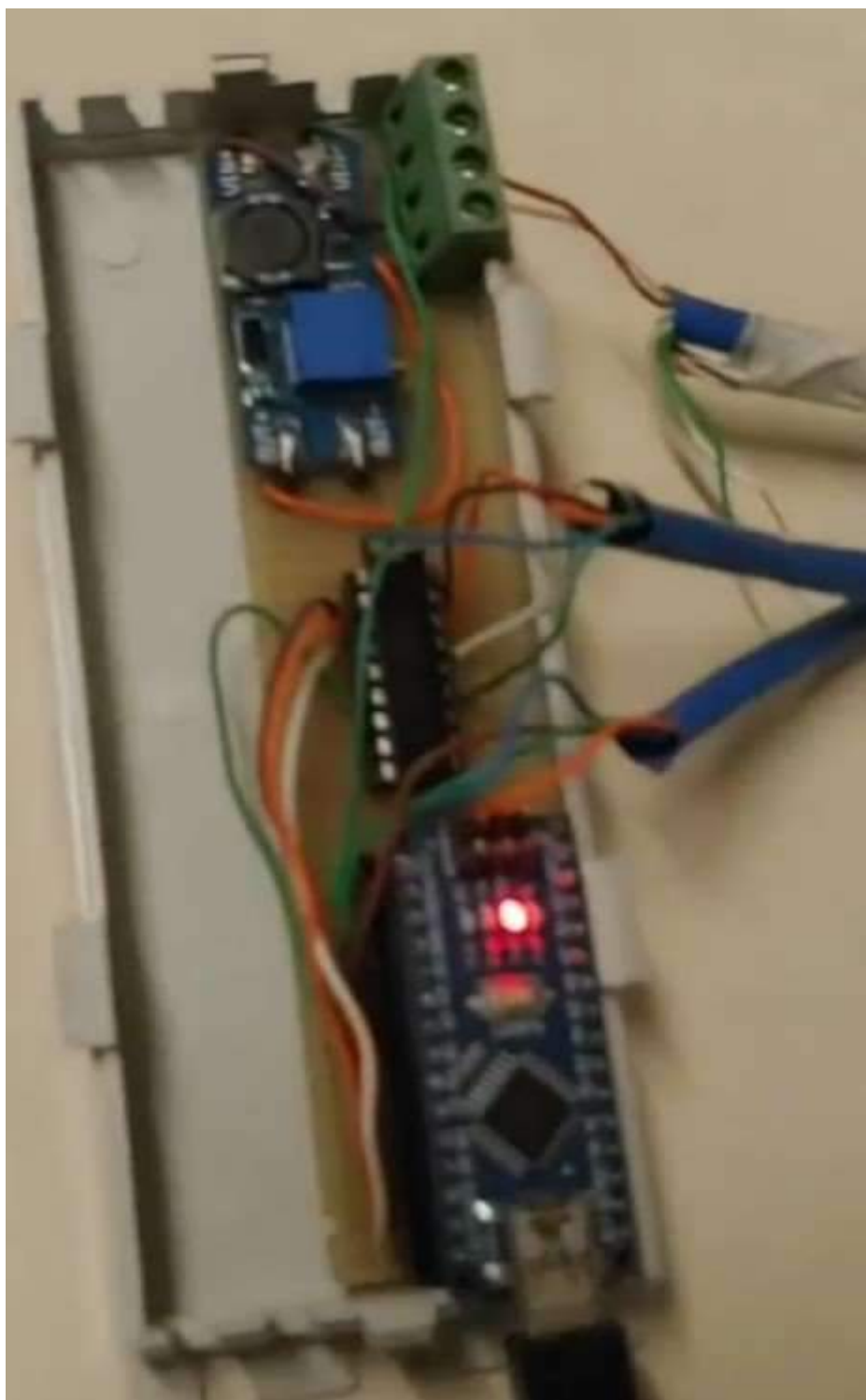
Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 17 - Solda do Hardware na placa furada



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 18 - Fixação placa na caixa de proteção



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 19 - Solução em uma caixa finalizada



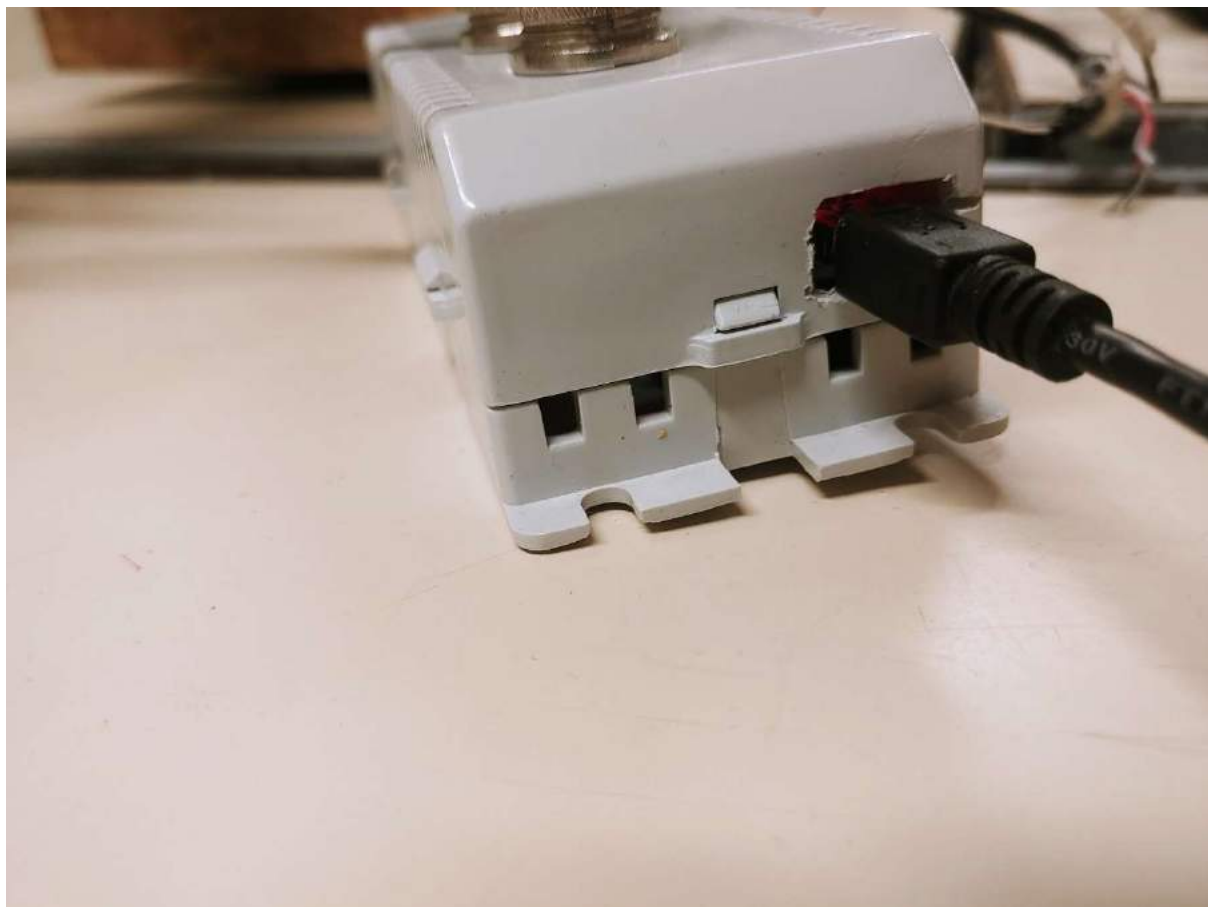
Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 20 - Entrada de sinais elétricos



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 21 - Saída USB



Fonte: Autoria própria (2022).

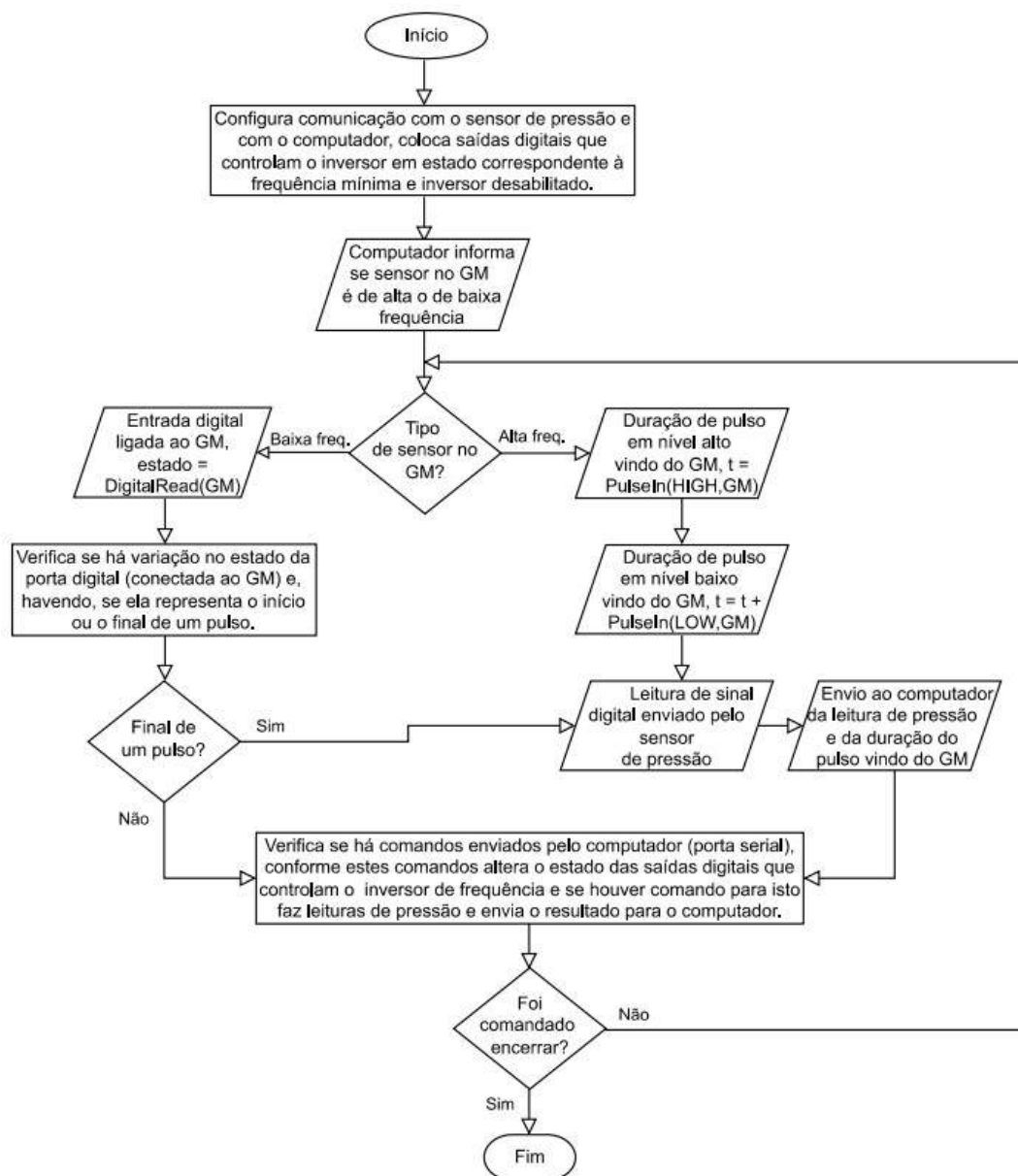
3.2 Desenvolvimento do *firmware*

A programação do *firmware* foi feita utilizando os recursos da linguagem de programação do microcontrolador Arduino (2022) e da biblioteca QueueHX711 Arduino Library (Russel, 2015) especificamente para receber os sinais digitais do conversor A/D do sensor de pressão.

Como ilustra a Figura 22 há duas abordagens sendo usadas, neste *firmware*, para determinar o período entre pulsos sucessivos enviados pelos medidores de gás (em inglês *gas meters*, abreviadamente GM nesta Figura e na seguinte). Para sensores de alta frequência foi usada a função `PulseIn()` que bloqueia todas as funções do microcontrolador até obter a duração de um pulso digital. Isto é necessário para não perder a duração de pulsos de microssegundos, mas é problemático se o microcontrolador fica bloqueado pelos segundos que pode durar um pulso de baixa frequência. Então, para sensores de baixa frequência, é usada a função `DigitalRead()` e um monitoramento das mudanças de estado da porta digital enquanto se percorre o loop do microcontrolador, que monitora a comunicação serial com o computador.

A cada período de pulsação completo o *firmware* envia para o computador o período de pulsação em microssegundos e a saída digital do sensor de pressão. Além disso, de acordo com comandos recebidos pelo computador em forma serial, o microcontrolador altera a velocidade de rotação do moto-ventilador ou desabilita o inversor de frequência.

Figura 22 - Fluxograma do *firmware*



Fonte: Autoria própria (2022).

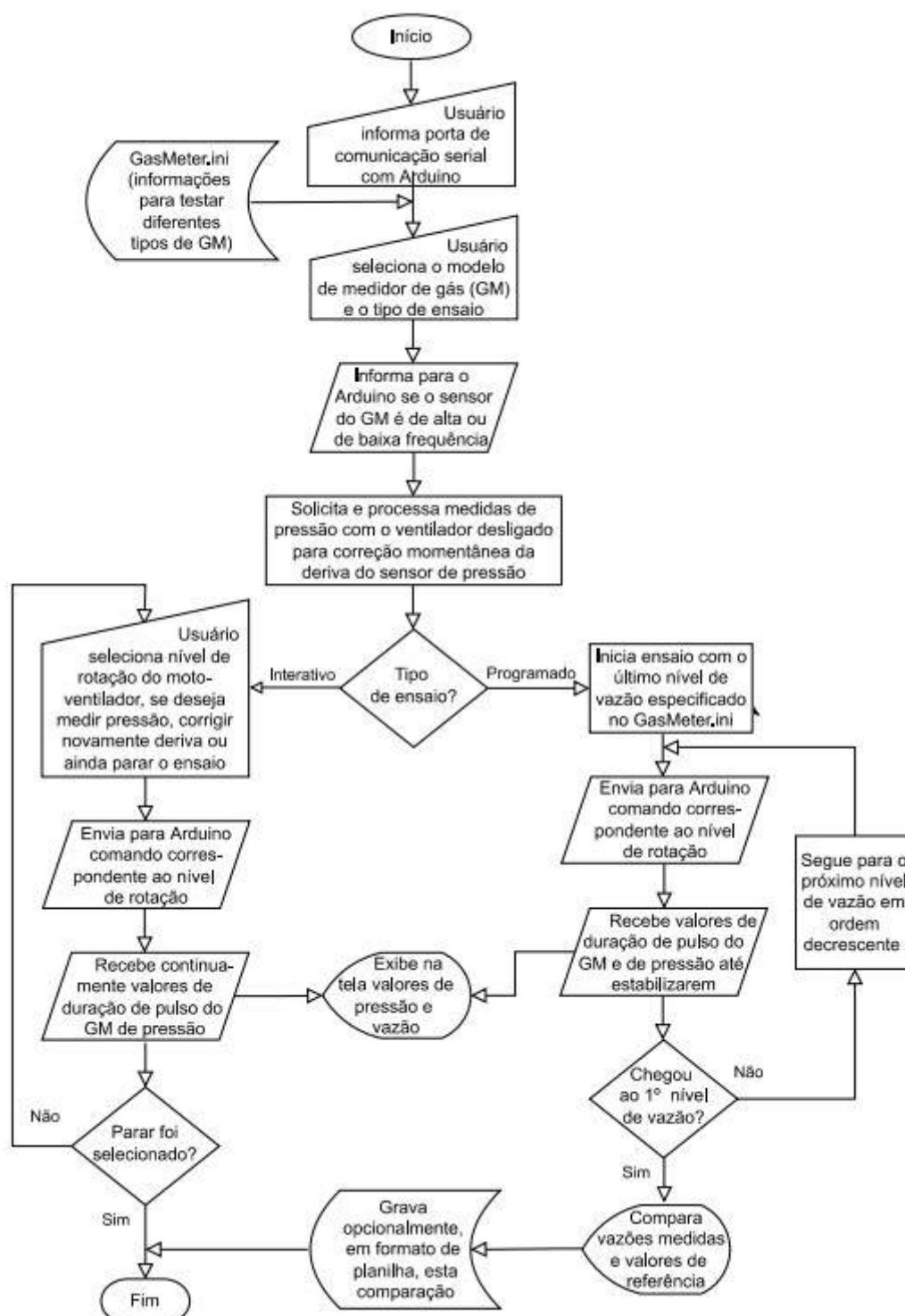
3.3 Desenvolvimento do Software

A plataforma escolhida foi para o desenvolvimento de *software* LabVIEW (NI, 2022), por ser de larga utilização na indústria. Na **Figura 23** é mostrado o fluxograma com as principais tarefas executadas por este *software*.

Para que o sistema fosse de fácil configuração para o usuário, foi criada um arquivo com parâmetros de cada modelo de medidor de gás: velocidades de rotação do moto-ventilador nos quais o medidor deve ser testado; vazões de referência correspondentes (àquelas velocidades e modelo) e finalmente o coeficiente do medidor como mostrado na **Figura 24**.

A palavra usada para identificação do modelo de medidor de gás foi criada tendo em vista as características nominais do mesmo. Para a identificação dos níveis de velocidades foi levada em conta a Tabela 2 de comando das frequências do inversor. Para cada velocidade de rotação do moto-ventilador e modelo do medidor de gás, há uma vazão de referência obtida com um medidor de gás de referência calibrado, que permite determinar o erro (desvio) do medidor em teste. Caso não haja vazões de referência se utiliza um valor qualquer menor que zero (negativo) e o *software* estima uma vazão de referência (com uma incerteza em torno de 15 %) a partir da pressão e do modelo de comportamento do ventilador discutido na seção 2.2.2.

Figura 23 - Fluxograma do software



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 24 - Arquivo de dados dos medidores e sensores

```
; Modelos de Gasmeters e seus parâmetros:
;-----
[MODELOS DE GASMETER]
[GM1]
MODELO = "FMT-Lx G250 HF"
VELOCIDADES = "2 5 7"
Q_REFS = "56,2 222 350"
K = 5320,502

;-----
[GM2]
MODELO = "FMT-Lx G250 LF"
VELOCIDADES = "2 5 7"
Q_REFS = "57,5 221 346"
K = 1

;-----
[GM3]
MODELO = "Dresser 3M175 G16 LF"
VELOCIDADES = "0 1 2"
Q_REFS = "3,2 10,3 21,0"
K=10

[Parametros_Gerais]
Resolucao = 1,205E-3
P0 = 10244,3
```

Fonte: Autoria própria (2022).

No início da configuração, mostrada na **Figura 25** se indica a porta COM na qual se encontra a conexão do sistema, após informar a Conexão do sistema, é configurador o modelo do medidor, na qual é importado as configurações intrínsecas do medidor, após Confirma Equipamento, o sistema está preparado para realizar teste tanto programado, quanto interativo, após a escolha do tipo de teste, com a confirmação do tipo de teste. Se inicia a aba Ensaio mostrada na **Figura 26**, na qual se passará o ensaio dinamicamente.

Figura 25 - Configuração alta frequência com ensaio interativo

The screenshot displays the 'Bancada de Teste para Gasimeters' software interface. The main window has a title bar with standard Windows controls (minimize, maximize, close). Below the title bar is a menu bar with 'Sobre...', 'Configurações', and 'Ensaio'. The 'Configurações' menu is currently selected, showing three configuration steps:

- 1: Defina a Comunicação.**
Porta Serial: COM6
Conectar!
- 2: Defina o Equipamento sob Teste**
Modelo de medidor de gás: FMT-Lx G250 HF
Resolução do sensor de P [Pa]: 0,001205
Saída do sensor a Patm [Pa]: 10244,3
Confirmar Equipamento!
- 3: Defina o Tipo de Ensaio**
Tipo de Ensaio: Ensaio Interativo
Confirmar Tipo de Ensaio!

At the bottom of the window, there is a 'PARE' button with a red stop icon.

Fonte: Autoria própria (2022).

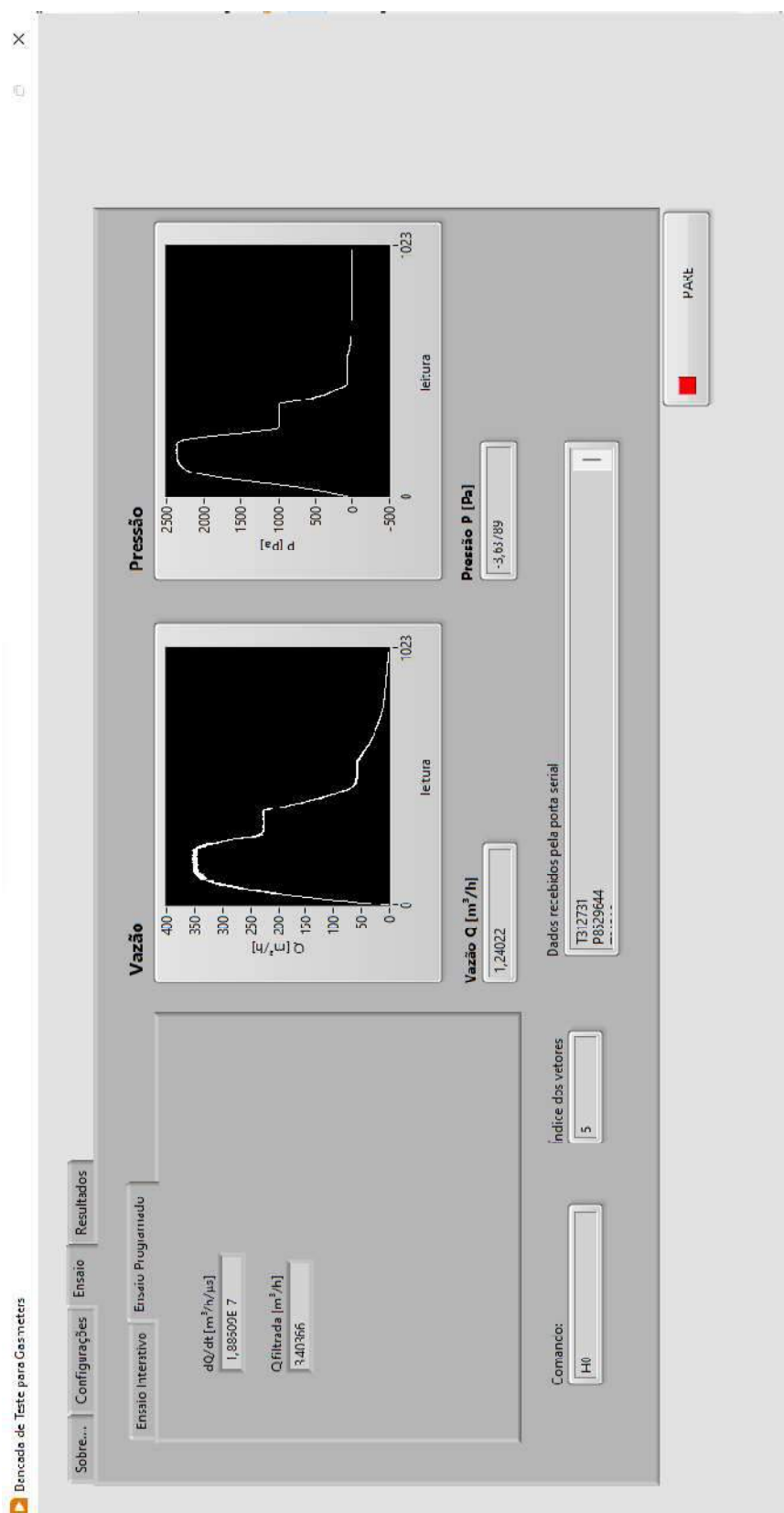
Com todas as configurações feitas o Ensaio se inicia.

Caso o tipo de ensaio escolhido seja o Ensaio Programado (**Figura 26 e Figura 27**), o sistema, irá percorrer as velocidades de rotação do moto-ventilador, especificadas no arquivo GasMeter.ini, para o modelo de medidor de gás selecionado.

Para cada uma dessas velocidades são feitas medidas (pelo menos 100 para sensor de alta frequência e 5 quando o sensor é de baixa frequência) e quando a vazão chegar à estabilidade, registra-se essa vazão de teste e se prossegue para fazer a próxima velocidade.

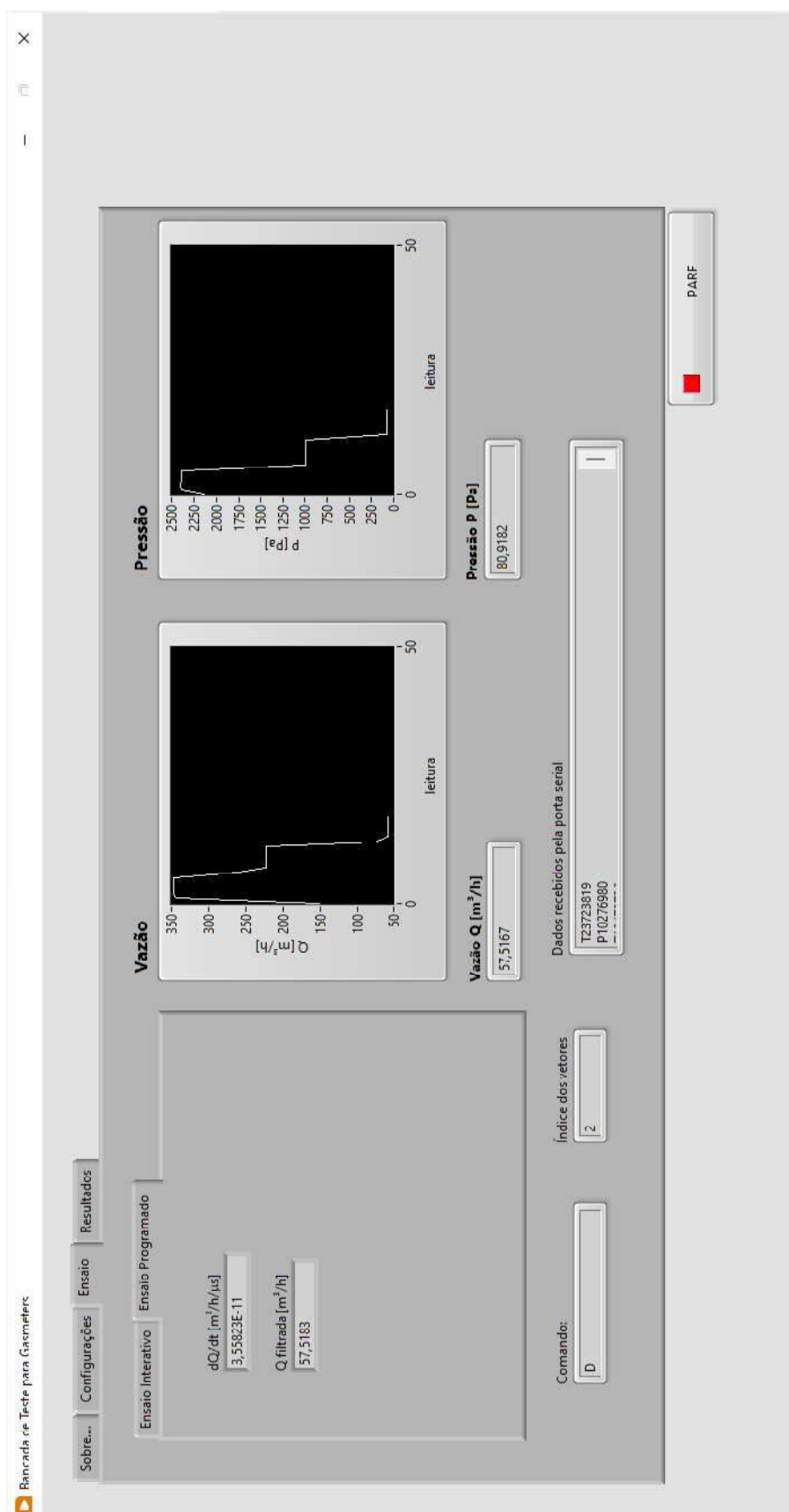
Para verificar a estabilidade se calcula a derivada $\frac{dQ}{dt}$. Ao chegar em $\frac{dQ}{dt} \sim 0$ o sistema entende que o comportamento está estável. Percorridas as velocidades especificadas é finalizado o Ensaio Programado e o sistema passa a apresentar a aba Resultados (**Figura 28 e Figura 29**), permitindo avaliar se o medidor em teste deve ser aprovado ou não baseado em tolerâncias especificadas. Nesta mesma aba ficam disponíveis dados médios do ensaio realizado, bem como seus erros. No lado direito da tela é mostrado o gráfico da Vazão de Teste x Vazão de Referência, no qual é gerada a faixa de tolerância do sistema. Caso seja necessário o sistema envia os resultados para uma planilha, assim podendo ser gerado algum histórico para estudo de erros sistemáticos do medidor.

Figura 26 - Ensaio Programado alta frequência



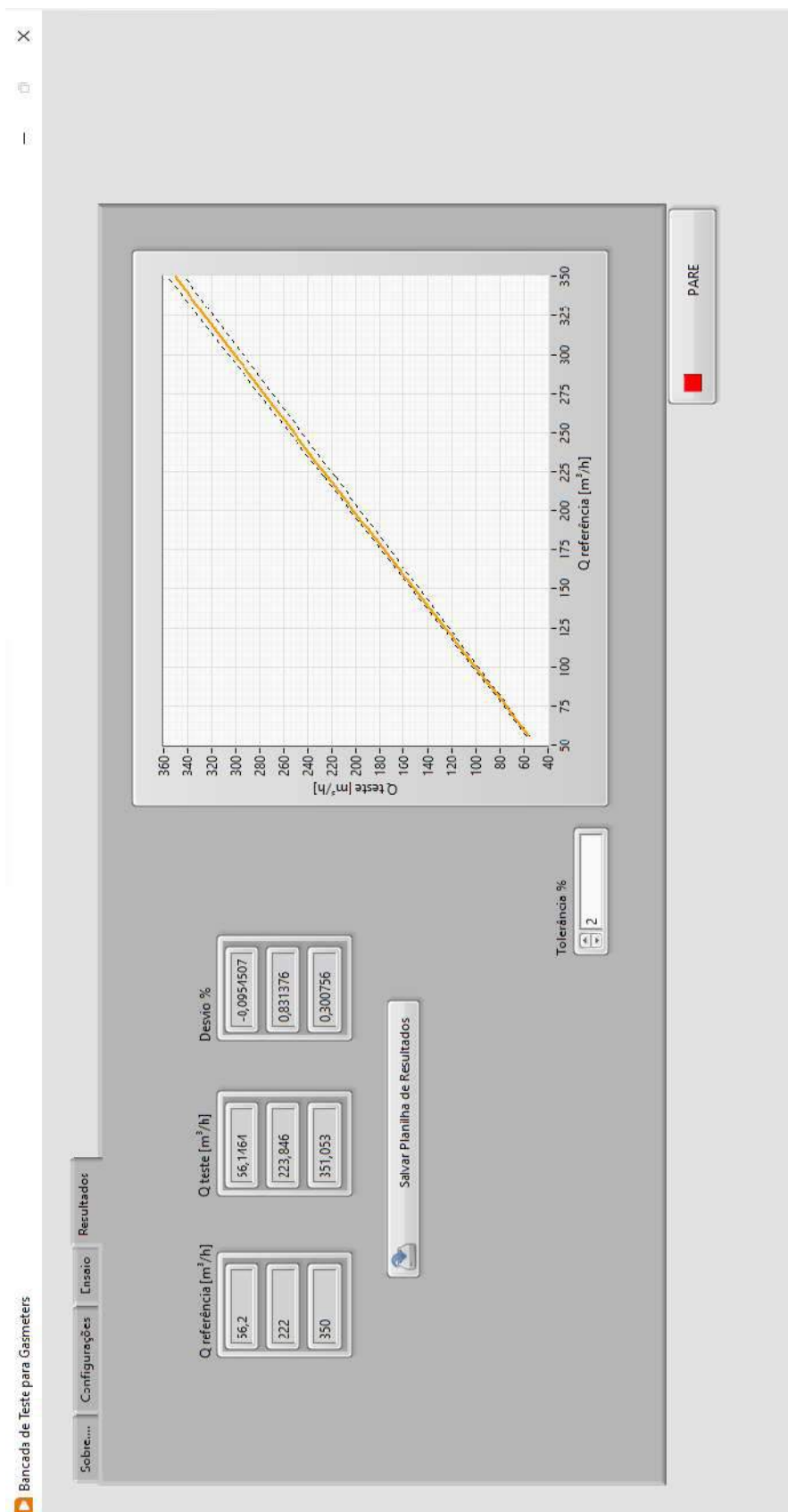
Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 27 - Ensaio Programado baixa frequência



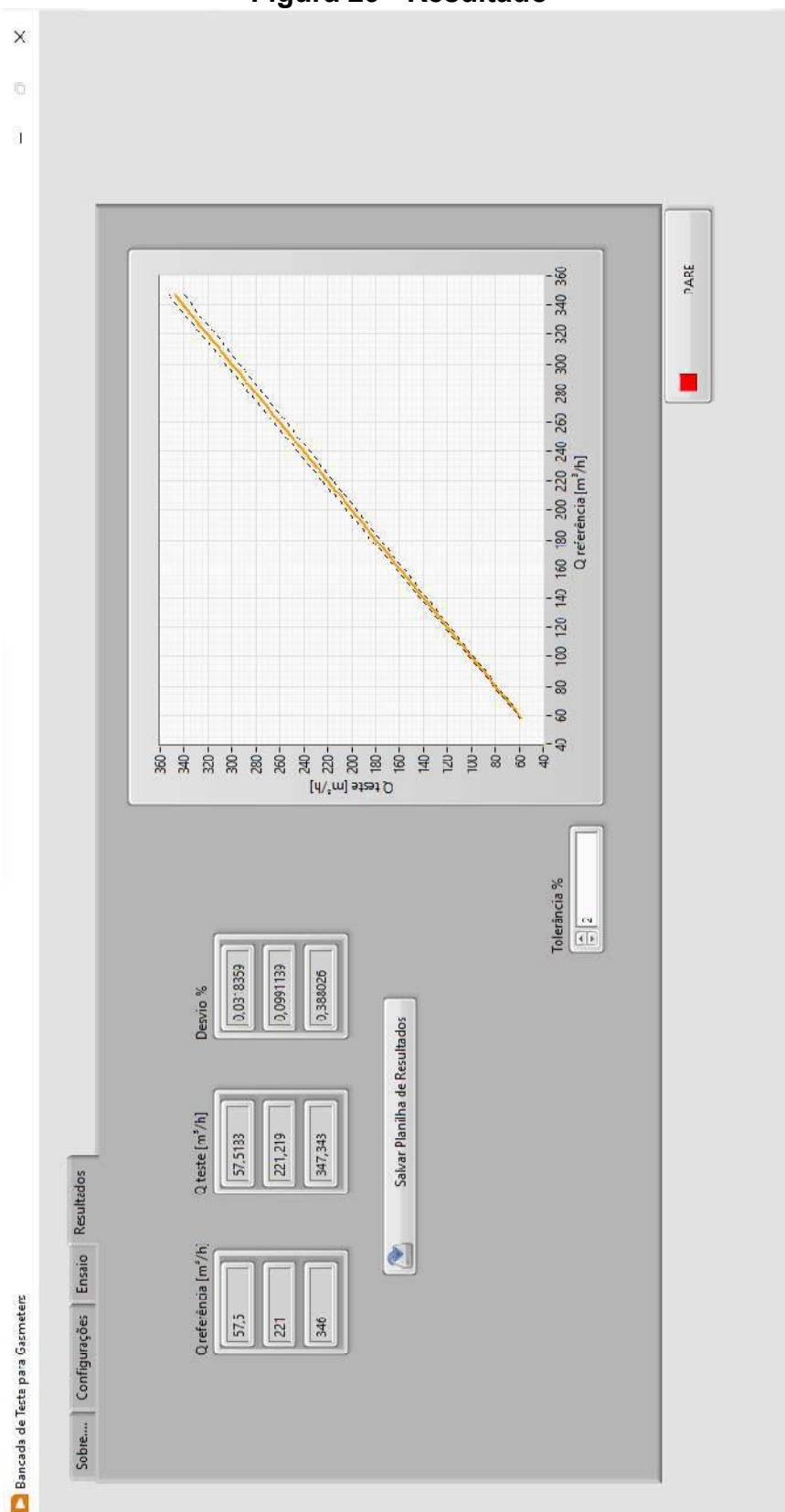
Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 28 - Resultado



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 29 - Resultado

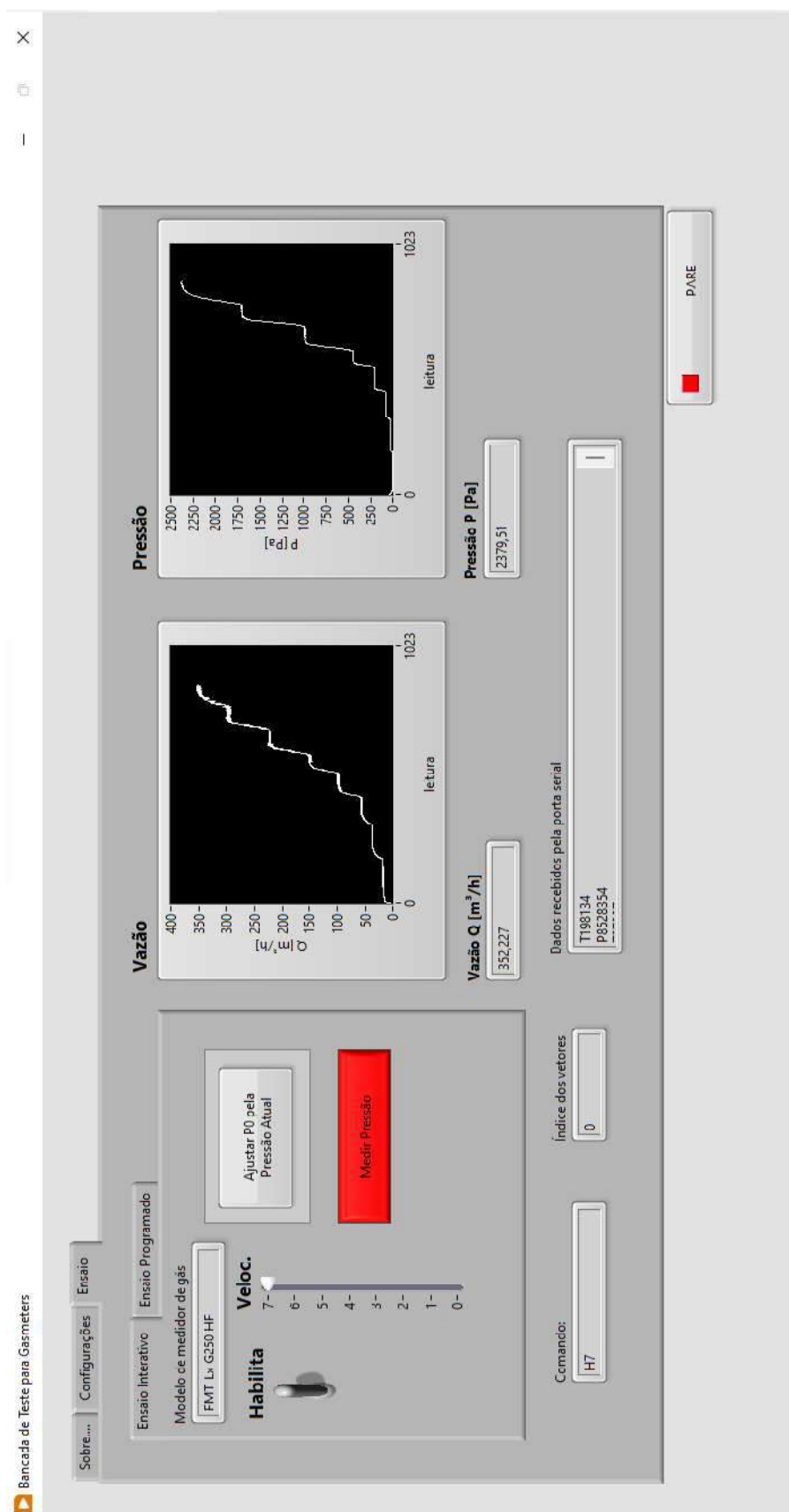


Fonte: Autoria própria (2022).

Fazendo a opção pelo Ensaio Interativo (**Figura 30 e Figura 31**) o usuário pode escolher em tempo real a velocidade de rotação do moto-ventilador dentro dos limites especificados no arquivo GasMeter.ini para o modelo de medidor de gás escolhido.

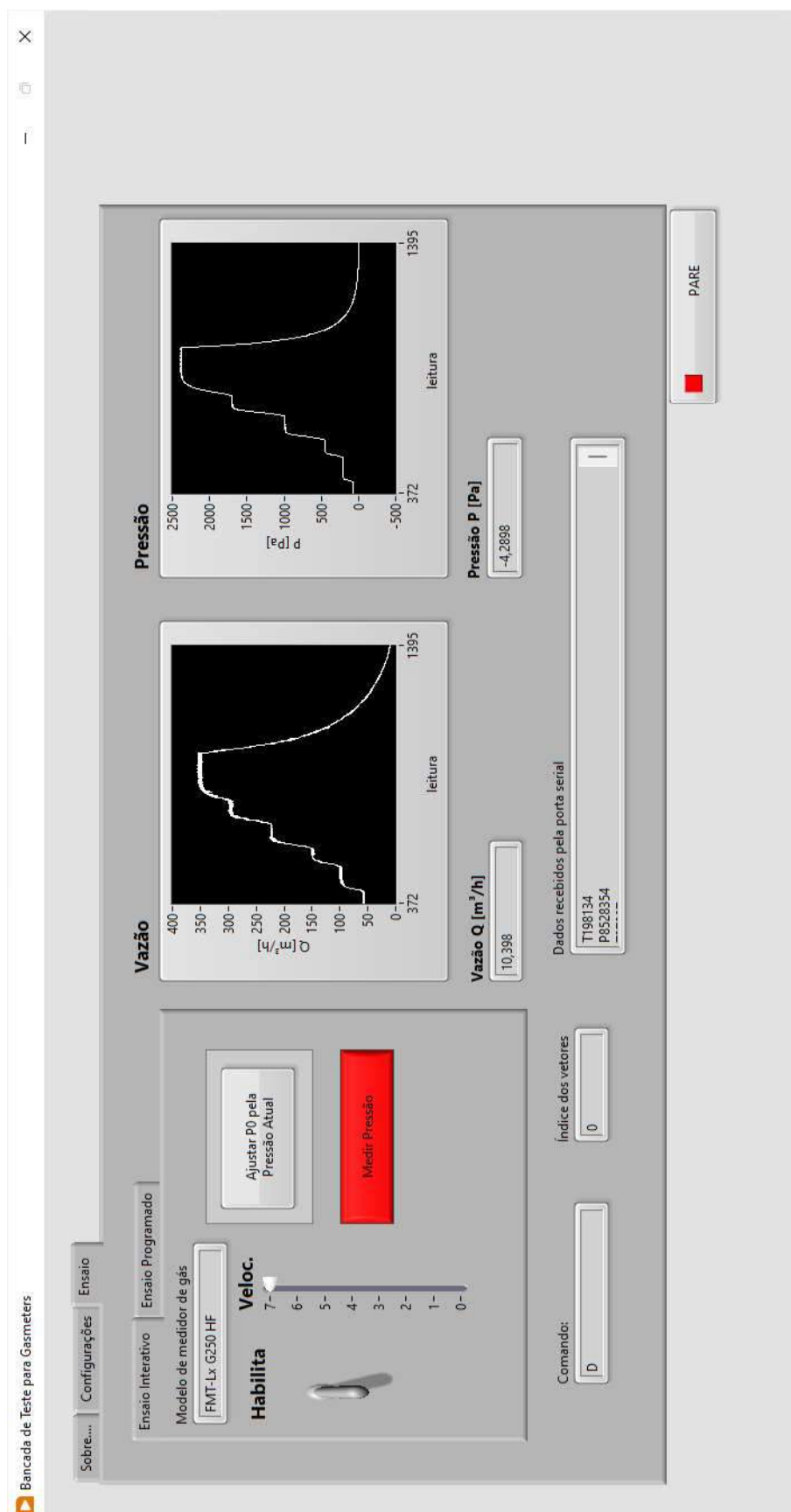
Antes de iniciar o ensaio é necessário esperar o medidor ficar completamente parado, para a que a tara do sensor de pressão seja feita corretamente. Este tipo de ensaio não prevê uma tela de Resultados como a do Ensaio Programado.

Figura 30 - Ensaio Interativo alta frequência



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 31 - Ensaio Interativo alta frequência - desaceleração

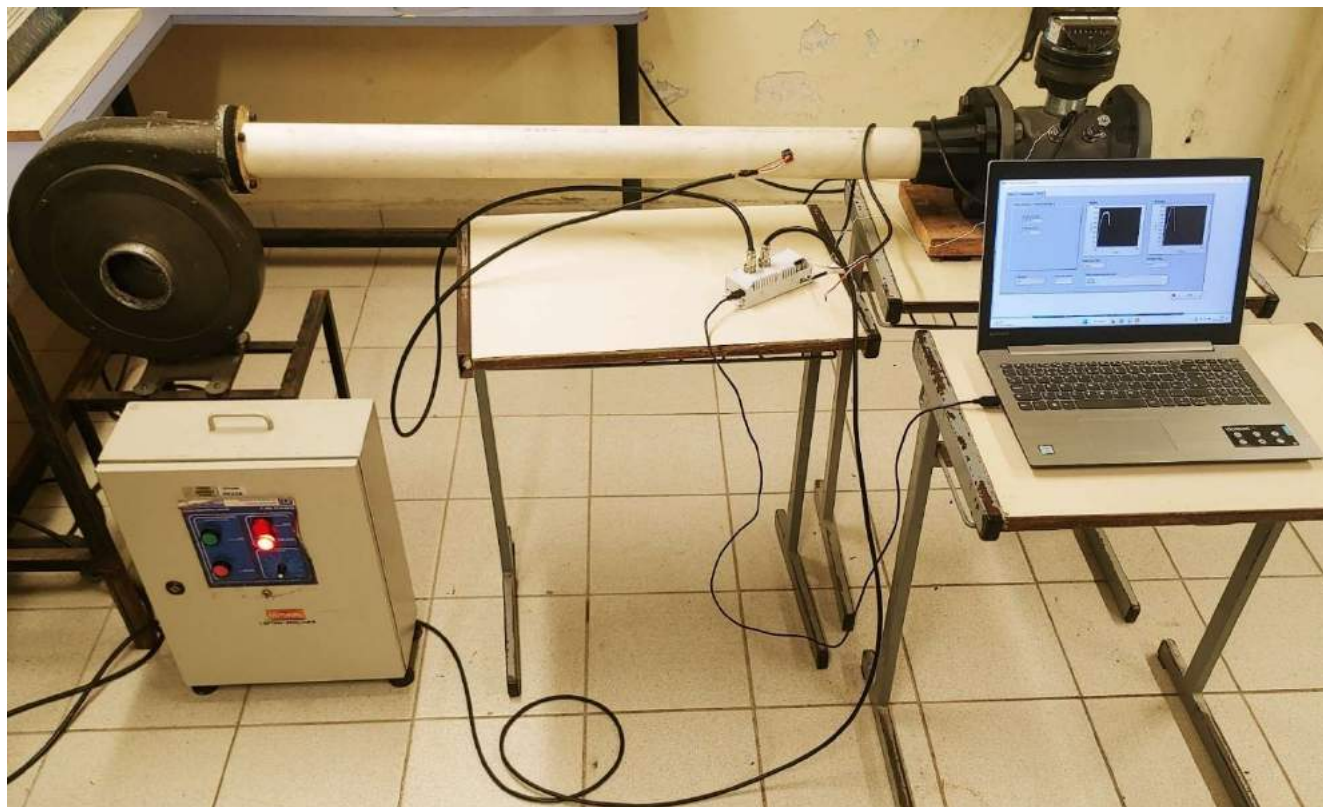


Fonte: Autoria própria (2022).

3.3 Sistema Completo

A **Figura 32** mostra a disposição do sistema completo com os todos os seus componentes, para o teste de um medidor de gás do tipo turbina.

Figura 32 - Sistema Completo



Fonte: Autoria própria (2022).

4 CONCLUSÃO

O objetivo geral foi alcançado na medida que temos um sistema funcionando, que permite testar medidores de gás de forma de programada ou interativa com incertezas menores que 2%, quando usado um medidor de referência com as mesmas características do medidor em teste. Além disso, quando não se dispõe de um medidor de referência com essa similaridade o sistema é capaz de utilizar um modelo do comportamento do ventilador para fazer uma verificação com incerteza em torno de 15%.

Naturalmente os objetivos específicos nos quais, inserido ao contexto de conhecer a teoria necessária para o desenvolvimento do sistema foi necessário para compreender que devido a faixa de frequência da corrente imposta ao moto-ventilador pelo inversor, desafio técnico focal de nosso trabalho. De mesma forma projetar e construir a parte mecânica e eletrônica do sistema, foi concluído pois temos um sistema eletromecânico com Hardware, Firmware e Software ambos operacionais. Além do qual foi pensado em compatibilizar a bancada com software desenvolvido para sua operação e testar o funcionamento do conjunto.

Na realização do presente trabalho percebeu-se a importância da identificação das faixas de vazão e pressão (perda de carga), nas quais será necessário verificar o comportamento dos medidores de gás, para a escolha de medidores e ventiladores compatíveis com esta necessidade. Ao longo deste trabalho foram verificados alguns coeficientes de perda de carga dos medidores de gás, que permitem aprimorar a concepção e as escolhas aqui feitas.

4.1 Recomendações

Utilizar sensores de pressão de melhor qualidade, talvez dois ou três, com alguns tendo faixas de operação mais estreitas que a do sensor usado no presente trabalho. Estes sensores permitiriam maior exatidão na medição de baixas pressões manométricas, cruciais para a verificação dos medidores de gás atravessados por baixas vazões.

Substituir o motor elétrico ou o inversor de frequência de modo que se possa utilizar o moto-ventilador em sua potência nominal (ou eventualmente utilizar

um moto-ventilador de potência um pouco mais elevada), garantindo a possibilidade de se aproximar do limite de vazão dos medidores de gás de maior capacidade.

Adequar o *software* e o *hardware* para o uso de comunicação Modbus disponível em sensores de pressão e em inversores de frequência melhores que os usados no presente trabalho.

Não desprezar a possibilidade de se partir para soluções mais convencionais, como o uso de medidor de referência incorporado ao sistema e de medidor de vazão acoplado à sucção ao invés de à descarga do ventilador e ainda de uso de sopradores de lóbulos para verificar medidores de gás de lóbulos rotativos.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR ISO 9951: **Medição de vazão de gás em condutos fechados**. Medidores tipo turbina. Rio de Janeiro. 2002.

ABNT. NBR : **Medição de vazão de gás em condutos fechados**. Medidores tipo turbina. Rio de Janeiro. 2002.

AEROSEMI. **MT3608 High Efficiency 1.2MHz 2A Step Up Converter**. 2022. Disponível em: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1131968/ETC1/MT3608.html> . Acesso em: 9 de dezembro. 2022.

ARDUINO. **What is Arduino?**. 2022. Disponível em: <https://www.arduino.cc/>. Acesso em: 9 de dezembro. 2022.

ASHLIN. **What is a meter prover?**. Disponível em: <https://automationforum.co/what-is-a-meter-prover/>. Acesso em: 9 de dezembro. 2022.

EFOO. **LFM108 Differential Pressure Transmitter**. Disponível em: <https://www.lefoogroup.com/uploads/file/lfm108-differential-pressure-transmitter.pdf> Acesso em: 9 de dezembro. 2022.

BUNETTI, F. **Mecânica dos Fluidos**, São Paulo, Prentice Hall, 2007

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos**. Trad. SALTARA et al., 3ª ed., Ed. AMGH, 2015.

DOEBELIN, E. O. **Measurement Systems**. 4ª ed., Ed. Mc. Graw-Hill, 1990.

DRESSER. **Accuracy Testing**. 2022. Disponível em: <https://dresserutility.com/dresser-measurement/asset-management/ease-of-maintenance/accuracy-testing/> Acesso em: 9 de dezembro. 2022.

DRESSER. **Dresser Series B3 Rotary Meter**. 2021. Disponível em: <https://dresserutility.com/wp-content/uploads/NGS-MI-0019.pdf> .Acesso em: 9 de dezembro. 2022.

EMERSON. **Lista de Provedores**. Disponível em: <https://www.emerson.com/pt-br/catalog/meter-provers?fetchFacets=true#facet:&partsFacet:&facetLimit:&productBeginIndex:0&partsBeginIndex:0&orderBy:&partsOrderBy:&pageView:grid&minPrice:&maxPrice:&pageSize:&facetRange:&> Acesso em: 7 de Outubro. 2022.

FIGLIOLA R. S.; BEASLEY D. E. **Theory and Design for Mechanical Measurements 4th ed**, WILEY. 2006.

HRISKO, J . **MPS20N0040D Pressure Sensor Calibration with Arduino**, 2020. Disponível em: <https://makersportal.com/blog/2020/6/4/mps20n0040d-pressure-sensor-calibration-with-arduino> . Acesso em: 7 de Outubro. 2022.

LEFOO. **LFM108 Differential Pressure Transmitter**. Disponível em: <https://www.lefoogroup.com/uploads/file/lfm108-differential-pressure-transmitter.pdf> Acesso em: 9 de dezembro. 2022.

MONTEIRO J. **Gás Natural Aplicado à Indústria e ao Grande Comércio** BLUCHER, 2010.

INMETRO. Portaria nº 156, de 30 de março de 2022: Anexo A – **Regulamento Técnico Metrológico para Medidores de Vazão de Gás Natural, Biometano e Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) em Fase Gasosa**. Duque de Caxias: INMETRO, 2022.

INMETRO. **Vocabulário Internacional de Metrologia – Conceitos fundamentais e gerais e termos associados** (VIM 2012). Duque de Caxias: INMETRO, 2012.

NI. **What Is LabVIEW?** Disponível em: <https://www.ni.com/pt-br/shop/labview.html>
Acesso em: 9 de dezembro. 2022.

PANDELOVA, A. L.; ALEKSANDROVA T.; CHAVDAROVA Z. **Calibration of gas flow meter with Test Bench ITF2500-1-A. Metrology and Metrology Assurance**, Bulgaria, pp. 101-106, 2017.

RUSSEL, S. **QueueTUE HX711 Arduino Library**. 2015. Disponível em:
<https://github.com/queueTUE/Q2-HX711-Arduino-Library> Acesso em: 9 de dezembro. 2022.

RIBEIRO M. **Medição de Petróleo e Gás Natural**, TEK. 2003.

SILVER. **Medidores de flujo de turbina (TUF) utilizados en el campo de la industria**. Disponível em: <https://es.silverinstruments.com/blog/turbine-flow-meters-tuf-used-in-oil-and-gas-industry-field.html> Acesso em: 9 de dezembro. 2022.

TOSHIBA. **TD62004AP**. Disponível em: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/32248/TOSHIBA/TD62004AP.html>. Acesso em: 9 de dezembro. 2022.

WEG. Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM .

Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h35/h10/WEG-motores-de-inducao-alimentados-por-inversores-de-frequencia-pwm-50029351-brochure-portuguese-web.pdf>). Acesso em: 7 de Outubro. 2022