

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LUCAS BARACAT LOECK

**DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO
DE MEDIÇÃO DE VAZÃO DE AR
BASEADO EM ORIFÍCIO EM UMA
TUBULAÇÃO**

Porto Alegre

2016

LUCAS BARACAT LOECK

**DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO
DE MEDIÇÃO DE VAZÃO DE AR
BASEADO EM ORIFÍCIO EM UMA
TUBULAÇÃO**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Alexandre Balbinot

Porto Alegre

2016

LUCAS BARACAT LOECK

**DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO
DE MEDIÇÃO DE VAZÃO DE AR
BASEADO EM ORIFÍCIO EM UMA
TUBULAÇÃO**

Este Projeto foi julgado adequado para a obtenção dos créditos da Disciplina Projeto de Diplomação do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Alexandre Balbinot, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul –
Porto Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Rafael Antônio Comparsi Laranja, UFRGS

Prof. PhD. Leia Bernardi Bagesteiro, UFRGS

Eng. Me. Vinicius Cene, UFRGS

Porto Alegre, dezembro de 2016.

RESUMO

A medição de vazão está presente em larga escala em diversos segmentos industriais, além de ter importante papel no cotidiano, como, por exemplo, no consumo de água, gás, gasolina etc. A medição de vazão está muitas vezes associada à comercialização de fluidos, como no caso da indústria petrolífera. Portanto a qualidade da medição de vazão é determinante em termos financeiros, tornando cada vez maior o nível de exigência do mercado em relação a medidores com menor erro possível. Este trabalho consiste no desenvolvimento de um protótipo de medição de vazão de ar através do método de orifício. O objetivo principal é medir a vazão de ar que flui dentro de uma tubulação. O método usado utiliza uma placa de orifício como obstáculo ao escoamento que provoca um diferencial de pressão. Este diferencial de pressão é medido, usando um sensor de pressão diferencial piezoresistivo, que gera uma sinal de tensão elétrica analógica. O sinal gerado é, então, condicionado e convertido em um valor equivalente de vazão através de *software* implementado em uma plataforma comercial Arduino Uno. O sistema de medição desenvolvido neste trabalho se propõe a medir vazão de ar de $15m^3/h$ a $50m^3/h$. A resolução de entrada obtida é de $0,125m^3/h$ e o erro de conformidade apresentado da função de transferência experimental do sistema é de $0,41\%$ do fundo de escala. As medidas obtidas a partir do sistema desenvolvido foram comparadas às de um medidor de vazão comercial. Dessa forma, a máxima diferença entre os dois medidores foi de $0,46\%$ do fundo de escala. Portanto, a partir do protótipo desenvolvido neste trabalho, foi possível medir vazão de ar em uma tubulação.

Palavras-chave: Medição de vazão, placa de orifício, pressão diferencial.

ABSTRACT

Flow measurement is present in large scale in diverse industrial sectors, besides having an important role in daily life, as, for example, in the consumption of water, LP gas, gasoline etc. Flow measurement is often associated with the commercialization of fluids, such as in the oil industry. Thus, the quality of flow measurement is determinant in financial terms, increasing the level of demand for meters with minimal error in the market. This work consists on the development of a prototype of air flow measurement based in the method of orifice. The main goal is to measure air flow inside a pipe. The method used in this work utilizes an orifice plate as an obstacle to the flow which causes a pressure drop. This differential pressure is measured using a piezoresistive differential pressure sensor, which generates a signal of analog voltage. Then, the generated signal is conditioned and converted to an equivalent value of flow through software implemented in a commercial platform Arduino Uno. The system of measurement developed in this work proposes to measure air flow from $15m^3/h$ to $50m^3/h$. The input resolution obtained is of $0.125m^3/h$ and the conformity error of the transfer function presented is of 0.41% of full scale. The measures obtained from the system developed in this work were compared to measures from a commercial flowmeter. The maximum difference between the two meters was of 0.46% of full scale. Thus, through the prototype developed in this work, the measurement of air flow in a pipe was achieved.

Keywords: flow measurement, orifice plate, differential pressure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Escoamento laminar e seu perfil de velocidade	12
Figura 2 - Escoamento turbulento e seu perfil de velocidade	13
Figura 3 - Vazão através de um plano em uma área definida	16
Figura 4 - Escoamento em um duto com variação de velocidade, pressão e elevação	19
Figura 5 - Duto com seção variável	19
Figura 6 - Esboço de uma placa de orifício	22
Figura 7 - Representação da vazão através da placa de orifício	22
Figura 8 - Orientação de tomadas de pressão	24
Figura 9 - Tubo de venturi Clássico	25
Figura 10 - Composição do Tubo de venturi	26
Figura 11 - Bocal de vazão entre flanges	26
Figura 12 - Diagrama de blocos do sistema de medição proposto	29
Figura 13 - Placa de orifício desenvolvida	32
Figura 14 - Desenho do conjunto de flanges e placa de orifício	33
Figura 15 - Conjunto de flanges desmontado	34
Figura 16 - Acoplamento do sensor de pressão diferencial às tomadas de pressão . .	34
Figura 17 - Diagrama de blocos do circuito condicionador	35
Figura 18 - Diagrama esquemático do circuito de <i>offset</i>	36
Figura 19 - Diagrama esquemático do circuito de amplificação	37
Figura 20 - Diagrama esquemático do circuito de ganho	38
Figura 21 - Diagrama de Bode do filtro <i>anti-aliasing</i>	39
Figura 22 - Cadeia de medidas proposta do sistema	40
Figura 23 - Diagrama de blocos da aquisição de dados do sistema	41
Figura 24 - Instalação para o procedimento de calibração do sistema	42
Figura 25 - Função de transferência experimental de tensão de saída do sistema . .	46

Figura 26 - Comparação entre função de transferência teórica e função de transferência experimental	47
Figura 27 - Cadeia de Medidas experimental do sistema	48
Figura 28 - Foto do sistema de medição completo	50
Figura 29 - Desenho da placa de orifício desenvolvida	55
Figura 30 - Desenho dos flanges usados no trabalho	56
Figura 31 - Diagrama Esquemático do Circuito Desenvolvido	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação de n com o Número de Reynolds para um tubo	13
Tabela 2 - Coeficiente de descarga para placa de orifício com tomadas em flange . .	31
Tabela 3 - Fator de expansão para placa de orifício	31
Tabela 4 - Medidas realizadas para a determinação da função de transferência ex- perimental	45
Tabela 5 - Resolução de entrada e de saída do sistema	45
Tabela 6 - Características do sistema de medição de vazão	46
Tabela 7 - Comparação entre função de transferência teórica e função de transfe- rência experimental	47
Tabela 8 - Medidas finais comparativas de vazão	50

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1	Definição de Vazão	11
2.1.1	Regimes de Escoamento	12
2.1.2	Número de Reynolds	13
2.1.3	Escoamento Compressível e Incompressível	14
2.2	Conceitos Básicos de Medição de Vazão	14
2.2.1	Conservação de Massa	14
2.2.2	Equação da Continuidade	16
2.2.3	Equação de Euler	17
2.2.4	Equação de Bernoulli	17
2.3	Métodos Típicos para Medição de Vazão	21
2.3.1	Placa de Orifício	21
2.3.2	Tubo de Venturi	25
2.3.3	Bocais de Vazão	26
2.4	Conceitos Básicos sobre Medição de Pressão	27
2.4.1	Definições de Pressão	27
2.4.2	Conceitos Básicos sobre Sensores de Pressão	28
3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	29
3.1	Desenvolvimento do Sistema de Medição	30
3.1.1	Desenvolvimento da Placa de Orifício	30
3.1.2	Descrição da Tubulação e dos Flanges	33
3.1.3	Descrição do Sensor de Pressão Diferencial	34
3.2	Descrição do Circuito Condicionador	35

3.2.1	Circuito de <i>Offset</i>	36
3.2.2	Estágio de Amplificação	36
3.2.3	Circuito de Filtragem <i>Anti-Aliasing</i>	37
3.3	Função de Transferência Teórica do Sistema	39
3.4	Descrição do Sistema de Aquisição de Dados com Arduino UNO	40
3.5	Procedimento de Determinação da Função de Transferência Experimental	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1	Cálculo da Placa de Orifício	44
4.2	Determinação da Função de Transferência Experimental	45
4.3	Cadeia de Medidas Experimental	48
4.4	Ensaio Final de Medidas	49
5	CONCLUSÕES	51
6	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	53
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
	ANEXO A DESENHO DA PLACA DE ORÍFICIO	55
	ANEXO B DESENHO DOS FLANGES USADOS	56
	ANEXO C DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO DESENVOLVIDO	57
	ANEXO D CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO MEDIDOR DE VAZÃO DE REFERÊNCIA	58
	ANEXO E ROTINA DE AQUISIÇÃO DESENVOLVIDA NO ARDUINO UNO	60

1 INTRODUÇÃO

A medição de vazão é uma tarefa necessária em inúmeras aplicações, seja no abastecimento de combustível de um carro, seja em um processo industrial de uma grande refinaria. Na indústria, a medição de vazão está presente no controle de consumo de líquidos e gases incluindo petróleo e gás natural, no controle de processos que exigem misturas de fluidos com proporções específicas, além de aplicações mais simples do dia-a-dia como consumo de água residencial.

Existem diversos métodos para se medir vazão, porém o mais usado historicamente é o método da medida de pressão diferencial, com evidências de seu uso desde os tempos da antiga civilização egípcia (DELMÉE, 1983), além do império romano (LANASA; UPP, 2014). Devido a décadas de uso comprovado, este é o método mais utilizado atualmente seguido de medidores vórtex e medidores magnéticos (BAKER; POZARSKI, 2016).

A medição de vazão por pressão diferencial utiliza as bases da mecânica dos fluidos desenvolvidas formalmente pelos físicos Bernoulli e Euler no século XVIII. Nele, uma restrição inserida na linha de fluxo produz um aumento na velocidade do fluido nesta região, como observado por Bernoulli, causando uma queda de pressão estática e portanto um diferencial de pressão através do obstáculo (WEBSTER, 1999).

Isto posto, este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de um protótipo de um medidor de vazão de um fluido dentro de uma tubulação. Os objetivos secundários são testar o protótipo desenvolvido, determinar sua precisão e repetibilidade. Para tanto, será usado o método de pressão diferencial utilizando placa de orifício. O fluido escolhido para a medição de vazão é o ar, por praticidade no trabalho e segurança. O transdutor de pressão diferencial escolhido é um sensor piezoresistivo com base de silício responsável por transformar a pressão diferencial, gerada pela placa de orifício, em um sinal de tensão elétrica. O sinal de tensão elétrica é então adquirido usando uma placa do microcontrolador Arduino Uno, usado no tratamento deste sinal transformando em um valor de vazão que é então mostrado em um *display*.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para projetar um sistema de medição é necessário conhecer os fenômenos que produzem a grandeza a ser medida. Portanto, nesta seção é apresentada uma revisão dos conceitos teóricos básicos que definem a vazão de fluidos, e uma descrição dos principais métodos de medição de vazão.

2.1 Definição de Vazão

De acordo com Benedict (1984), a *vazão volumétrica* pode ser definida como um volume que atravessa um dado plano em um dado intervalo de tempo. Dessa forma pode ser representada pela Equação (1):

$$Q = \frac{V}{\Delta t} \quad (1)$$

onde Q é a vazão volumétrica [m^3/s], V é o volume [m^3] e Δt é o intervalo de tempo [s].

Segundo Fox *et al.* (2006), a vazão volumétrica também é chamada de *taxa de fluxo de volume* e pode ser definida como a integral da velocidade do fluido em relação à área da seção que o mesmo atravessa de acordo com a Equação (2):

$$Q = \int v \, dA \quad (2)$$

onde Q é a vazão volumétrica [m^3/s], v é a velocidade do fluido [m/s] e A é a área da seção [m^2].

A vazão também pode ser representada através de uma determinada massa que atravessa um plano em um intervalo de tempo. Para isso, multiplica-se a Equação 1 pela densidade do fluido que constitui o volume, obtendo assim a *vazão mássica* representada pela Equação (3) (BENEDICT, 1984):

$$Q_m = \frac{\rho V}{\Delta t} = \frac{m}{\Delta t} \quad (3)$$

onde Q_m é vazão mássica [kg/s], ρ é a densidade do fluido [kg/m^3], V é o volume [m^3], Δt é o intervalo de tempo [s] e m é a massa [kg].

2.1.1 Regimes de Escoamento

O escoamento de um fluido dentro de uma tubulação pode seguir dois tipos de regimes: *laminar* ou *turbulento*. O regime de escoamento descreve o comportamento das partículas fluidas, e o perfil de velocidade do fluido dentro do tubo. Segundo Baker (2005) e Fox *et al.* (2006), um escoamento é dito laminar quando as partículas do fluido se movem de forma ordenada paralelamente às paredes do tubo em camadas lisas, sem a passagem de uma camada para outra. Neste caso, as forças de atrito entre o fluido e as paredes do tubo exercem as maiores forças de retardo gerando um perfil de velocidade parabólico conforme representado na Figura 1. Esse seria um caso ideal do ponto de vista de medição de vazão já que o comportamento do fluido tem alto grau de previsibilidade.

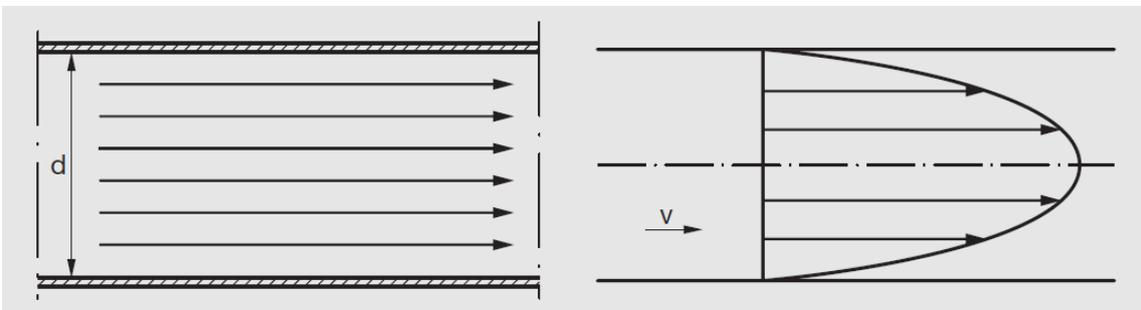


Figura 1: Escoamento laminar e seu perfil de velocidade. Fonte: ABB(2011).

Segundo Baker (2005), um procedimento para determinar a velocidade do fluido para escoamento laminar é através do uso da Equação (4).

$$v_p = v_0 \left[1 - \left(\frac{p}{R} \right)^2 \right] \quad (4)$$

onde v_p é a velocidade em um ponto p [m/s], v_0 é a velocidade no centro do tubo [m/s], p é o ponto radial onde se mede a velocidade [m] e R é o raio do tubo [m].

A velocidade média no tubo é dada pela Equação (5) (BAKER, 2005):

$$v = \frac{v_0}{2} \quad (5)$$

onde v é a velocidade média [m/s] e v_0 é a velocidade máxima (centro do tubo) [m/s].

Já o regime turbulento adiciona um movimento desordenado do fluido em todas as direções conforme representado na Figura 2, dessa forma as camadas se misturam rapidamente provocando alterações aleatórias de velocidade e pressão (FOX *et al.*, 2006). Estes movimentos aleatórios são indesejados do ponto de vista de medição de vazão, já que são imprevisíveis, porém na maioria das situações experimentais são praticamente inevitáveis (FOX *et al.*, 2006).

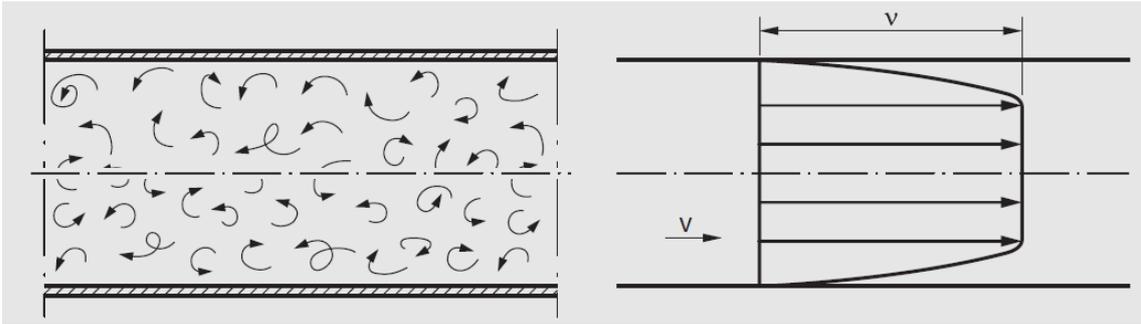


Figura 2: Escoamento turbulento e seu perfil de velocidade. Fonte: ABB(2011).

Ainda de acordo com Baker (2005), a velocidade do fluido no regime turbulento pode ser aproximada pela Equação (6):

$$v_p = v_0(1 - p/R)^{1/n} \quad (6)$$

onde v_p é a velocidade do fluido em um ponto p [m/s], v_0 é a velocidade máxima (centro do tubo) [m/s], p é o ponto radial onde se mede a velocidade [m], R é o raio do tubo [m], e n se relaciona com o número de Reynolds através da Tabela 1.

Tabela 1: Relação de n com o Número de Reynolds para um tubo.

Re	$4 \cdot 10^3$	$2,3 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$ a $3,2 \cdot 10^6$
n	6,0	6,6	7,0	8,8	10

Fonte: Baker (2005).

Portanto, o regime de escoamento é definido pelo *Número de Reynolds*, parâmetro que depende das características do fluido e dimensões do conduto e é descrito a seguir.

2.1.2 Número de Reynolds

O número de Reynolds Re é um parâmetro adimensional que define o padrão de escoamento do fluido a um determinado valor (BAKER, 2005). Ele representa a razão entre as forças de inércia e as forças de viscosidade no escoamento (WEBSTER, 1999). Quando o escoamento ocorre em um tubo circular, o número de Reynolds é calculado usando a Equação (7).

$$Re = \frac{\rho \bar{v} D}{\mu} \quad (7)$$

onde ρ é a densidade do fluido [kg/m^3], \bar{v} é a velocidade média do fluido [m/s], D é o diâmetro do tubo [m] e μ é a viscosidade dinâmica do fluido [$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$].

O Número de Reynolds crítico $R_{e_{cr}} \approx 2300$ define o ponto de transição entre os regimes laminar e turbulento (DELMÉE, 1983). Quando R_e é menor que o valor crítico, ou seja, para velocidades baixas e altas viscosidades, as forças entre o fluido e as paredes do tubo dominam e o escoamento tende a ser laminar (WEBSTER, 1999). Quando R_e é maior que o valor crítico, ou seja, maiores velocidades e/ou viscosidades baixas, o escoamento tende a ser mais turbulento conforme R_e aumenta (BAKER, 2005). Ainda, para valores de R_e entre 2000 e 4000 existe uma faixa de transição com características dos dois regimes (WEBSTER, 1999).

2.1.3 Escoamento Compressível e Incompressível

Segundo Fox *et al.* (2006), um escoamento é considerado *incompressível* quando a variação da massa específica do fluido ao longo do caminho é desprezível. Por outro lado, quando a massa específica do fluido varia, devido à alterações de pressão e de temperatura, esse escoamento é considerado *compressível*. Geralmente, o escoamento de líquidos sob pressões moderadas pode ser considerado incompressível, já o escoamento de gases é compressível.

No desenvolvimento do equacionamento da vazão, originado nas equações de Euler e Bernoulli descritas a seguir, o escoamento é considerado incompressível por motivos experimentais. Portanto, na aplicação em escoamentos compressíveis são utilizados fatores de correção descritos na seção 2.3, considerando a compressibilidade do gás, no cálculo dessas vazões.

2.2 Conceitos Básicos de Medição de Vazão

O equacionamento formal da vazão de fluidos é baseado na lei conservação de massa e nos princípios da mecânica dos fluidos. Estes conceitos compõem a base para as equações de Euler e de Bernoulli, descritas nesta seção, de onde partem as ferramentas matemáticas necessárias para a aplicação dos métodos de medição de vazão.

2.2.1 Conservação de Massa

De acordo com Benedict (1984), o princípio da conservação de massa é uma das premissas básicas da mecânica dos fluidos e é fundamental para o entendimento do conceito de vazão. Na ausência de fontes e sumidouros de massa, a conservação de massa exige que a massa m do sistema seja constante (FOX *et al.*, 2006). De acordo com Fox (2006),

este princípio é representado matematicamente pela Equação (8):

$$\left. \frac{dm}{dt} \right|_{\text{sistema}} = 0 \quad (8)$$

onde m é massa [kg] e t é tempo [s].

Portanto, em regime permanente, a quantidade de massa que entra em um sistema é igual à que sai do sistema dado que as duas sejam medidas no mesmo intervalo de tempo (BENEDICT, 1984) de acordo com a Equação (9):

$$\frac{m_{in}}{\Delta t} = \frac{m_{out}}{\Delta t} \quad (9)$$

onde m_{in} é a massa de entrada [kg], m_{out} é a massa de saída [kg] e t é tempo [s].

A massa m por sua vez é a integral da densidade do fluido no volume que atravessa o plano em um intervalo de tempo, conforme a Equação 10 (FOX *et al.*, 2006):

$$m = \int_V \rho dV \quad (10)$$

onde m é massa [kg], V é volume [m^3] e ρ é densidade do fluido [kg/m^3].

Portanto substituindo a Equação (10) em (9), chega-se à Equação (11) descrita por Benedict (1984):

$$\left(\frac{\rho V}{\Delta t} \right)_{in} = \left(\frac{\rho V}{\Delta t} \right)_{out} \quad (11)$$

onde ρ é densidade [kg/m^3], V é volume [m^3] e t é tempo [s].

Desta forma, de acordo com as Equações (2) e (6), a vazão mássica de entrada é igual à de saída (Equação (12)):

$$(Q_m)_{in} = (Q_m)_{out} \quad (12)$$

onde $(Q_m)_{in}$ é a vazão mássica de entrada [kg/s] e $(Q_m)_{out}$ é a vazão mássica de saída [kg/s].

Assim, de acordo com a Equação (12), para casos em que a densidade do fluido ρ é constante, a vazão volumétrica também será constante dentro de um caminho fechado, ou seja:

$$Q_{in} = Q_{out} \quad (13)$$

onde Q_{in} é a vazão volumétrica de entrada [m^3/s] e Q_{out} é a vazão volumétrica de saída [m^3/s].

2.2.2 Equação da Continuidade

Se for definida uma área A no plano $x - x$ atravessado por um volume durante um intervalo de tempo como representado na Figura 3, esta vazão pode ser descrita pela Equação (14) (BENEDICT, 1984):

$$Q = \frac{V}{\Delta t} = \int \frac{\Delta x dA}{\Delta t} = \int v_p dA \quad (14)$$

onde Q é a vazão volumétrica [m^3/s], V é volume [m^3], t é tempo [s], Δx é o comprimento do caminho [m], A é a área da seção [m^2] e v_p é a velocidade do fluido em um ponto [m/s].

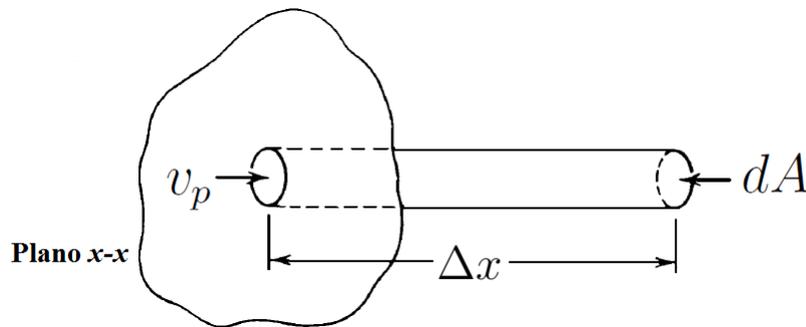


Figura 3: Vazão através de um plano em uma área definida. Fonte: Benedict (1984).

De acordo com a Equação (12), derivada do princípio de conservação de massa, a vazão é constante no sistema. Portanto, pode-se dizer que a Equação (15) é verdadeira:

$$\int v_p dA = constante \quad (15)$$

onde v_p é a velocidade do fluido em um ponto [m/s] e A é a área da seção [m^2].

Assim, considerando-se a velocidade média do fluido, a Equação (15) torna-se a Equação (16) comumente denominada *equação da continuidade* (BENEDICT, 1984):

$$vA = constante \quad (16)$$

onde v é a velocidade média do fluido [m/s] e A é a área da seção [m^2].

A equação da continuidade também pode ser representada com relação à vazão mássica, multiplicando a equação pela densidade do fluido ρ , resultando na Equação (17) (FOX *et al.*, 2006):

$$\rho vA = constante \quad (17)$$

onde ρ é a densidade do fluido [kg/m^3], v é a velocidade média do fluido [m/s] e A é a área da seção [m^2].

2.2.3 Equação de Euler

De acordo com a mecânica dos fluidos, a equação de Euler que descreve o movimento de um fluido incompressível e não-viscoso na direção da linha de corrente s com o eixo z dirigido verticalmente para cima é dada pela Equação (18) (FOX *et al.*, 2006):

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} - g \frac{\partial z}{\partial s} = \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial s} \quad (18)$$

onde ρ é a densidade do fluido [kg/m^3], p é a pressão do fluido [Pa], g é a aceleração gravitacional [m/s^2], v é a velocidade do fluido [m/s] e t é tempo [s].

Considerando-se o escoamento permanente, ou seja, a velocidade constante, e desprezando-se forças de corpo a Equação (18) se reduz à Equação (19):

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} = -v \frac{\partial v}{\partial s} \quad (19)$$

onde ρ é a densidade do fluido [kg/m^3], p é a pressão do fluido [Pa] e v é a velocidade do fluido [m/s].

A Equação (19) sugere uma relação entre a pressão e a velocidade do fluido, a qual é fundamental no desenvolvimento de um método de medição de vazão: uma diminuição na velocidade acompanha um aumento na pressão e vice-versa de acordo com FOX *et al.* (2006).

2.2.4 Equação de Bernoulli

Segundo Fox *et al.* (2006), uma aproximação conveniente para um problema de escoamento em regime permanente é integrar a equação de Euler (Equação (18)) ao longo de uma linha de corrente s resultando na equação de Bernoulli. Como descrito anteriormente, a equação de Euler para um escoamento constante e incompressível é:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} - g \frac{\partial z}{\partial s} = v \frac{\partial v}{\partial s} \quad (20)$$

onde ρ é a densidade do fluido [kg/m^3], p é a pressão do fluido [Pa], s é a linha de corrente [m], z é o eixo horizontal [m], g é a aceleração gravitacional [m/s^2], v é a velocidade do fluido [m/s].

Assim, multiplicando-se a Equação (20) pelo termo ds tem-se

$$-\frac{dp}{\rho} - gdz = vdv \quad \text{ou} \quad \frac{dp}{\rho} + vdv + gdz = 0 \quad (21)$$

onde ρ é a densidade do fluido [kg/m^3], p é a pressão do fluido [Pa], z é o eixo horizontal [m], g é a aceleração gravitacional [m/s^2] e v é a velocidade do fluido [m/s].

Ao integrar a Equação (21) ao longo da direção s , sabe-se que o resultado deve ser uma constante, ou seja:

$$\int \left(\frac{dp}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz \right) = \text{constante} \quad (22)$$

onde ρ é a densidade do fluido [kg/m^3], p é a pressão do fluido [Pa], z é o eixo horizontal [m], g é a aceleração gravitacional [m/s^2] e v é a velocidade do fluido [m/s].

Então, para o caso especial de escoamento incompressível, ρ é constante e a Equação (22) torna-se a *equação de Bernoulli* (Equação (23)):

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz = \text{constante} \quad (23)$$

onde p é a pressão do fluido [Pa], ρ é a densidade do fluido [kg/m^3], v é a velocidade do fluido [m/s], g é a aceleração gravitacional [m/s^2] e z é o eixo horizontal [m].

A equação de Bernoulli possui restrições. Ela é válida para um escoamento permanente, incompressível, sem atrito, ao longo de uma linha de corrente. A equação de Bernoulli é muito útil e aplicada na medição de vazão de fluidos, pois relaciona variações de pressão com aquelas de velocidade e de elevação ao longo de uma linha de corrente. Porém, deve ser aplicada apenas em casos em que todas as restrições impostas sejam razoáveis.

Considerando-se um caso de escoamento de um fluido em um duto onde existe variação de velocidade, de pressão e de elevação do fluido entre dois pontos 1 e 2, conforme esboço da Figura 4, observa-se que a equação de Bernoulli implica que esta relação indicada entre velocidade, pressão e elevação deve ser igual nos dois pontos (WEBSTER, 1999):

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gz_2 \quad (24)$$

onde p é a pressão do fluido [Pa], ρ é a densidade do fluido [kg/m^3], v é a velocidade do fluido [m/s], g é a aceleração gravitacional [m/s^2] e z é o eixo horizontal [m].

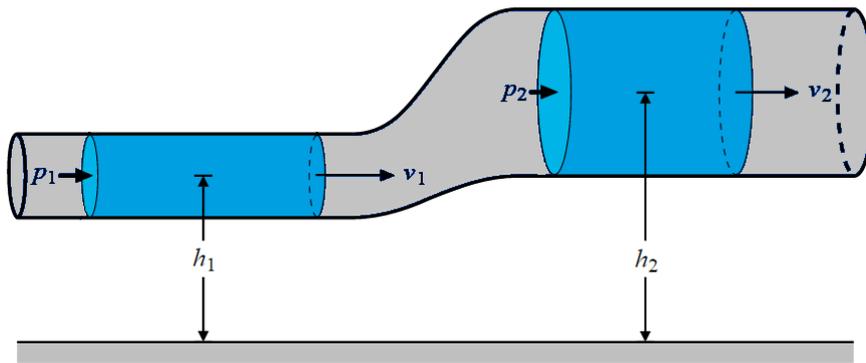


Figura 4: Escoamento em um duto com variação de velocidade, pressão e elevação.

Dessa forma, a equação de Bernoulli demonstra que a vazão em um duto pode ser medida através de uma restrição que provoque uma variação de velocidade e pressão do fluido (WEBSTER, 1999). Um caso especial muitas vezes aplicável, é o de um duto horizontal, portanto sem variação de elevação, conforme exemplo da Figura 5. Neste caso, tomando-se a Equação (24), $z_1 = z_2$ e através de uma simples manipulação chega-se à equação (25) (WEBSTER, 1999):

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \quad (25)$$

onde p é a pressão do fluido [Pa], ρ é a densidade do fluido [kg/m^3] e v é a velocidade do fluido [m/s].

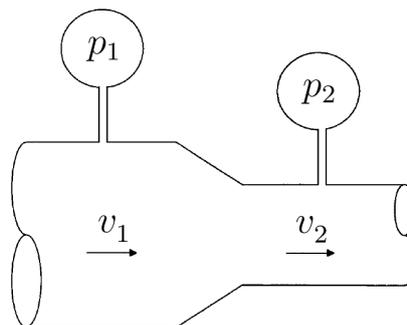


Figura 5: Duto com seção variável. Fonte: (WEBSTER, 1999).

A partir da equação da continuidade (Equação (17)), obedecendo a conservação de massa, tem-se a Equação (26):

$$v_2 = v_1 \frac{A_1}{A_2} \quad (26)$$

onde v_1 é a velocidade do fluido no ponto 1, v_2 é a velocidade do fluido no ponto 2 [m/s], A_1 é a área da seção do tubo no ponto 1 [m^2] e A_2 é a área da seção do tubo no ponto 2 [m^2].

Portanto utilizando a equação da continuidade (Equação (26)) aplicada na equação de Bernoulli para o caso de um duto horizontal (Equação (25)), chega-se à Equação (27), uma equação geral da vazão volumétrica em função da diferença de pressão do fluido entre dois pontos no duto (WEBSTER, 1999):

$$Q = v_1 A_1 = \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (27)$$

onde Q é a vazão volumétrica [m^3/s], v é a velocidade do fluido [m/s], A é a área da seção do tubo [m^2], p é a pressão do fluido [Pa], ρ é a densidade do fluido [kg/m^3].

Segundo Webster (1999), a Equação (27) descreve o princípio básico usado em todos os medidores de vazão por pressão diferencial: a vazão volumétrica pode ser determinada a partir da queda de pressão provocada por uma restrição no caminho do fluido. Como esta equação é obtida a partir da equação de Bernoulli, ela possui as mesmas restrições, assume que o escoamento é incompressível (ρ constante) e não viscoso. Em situações experimentais estas restrições geralmente não são obedecidas. Portanto, para aplicar essa equação em sistemas experimentais, são necessários fatores de correção, descritos na seção 2.3., considerando a compressibilidade e a viscosidade do fluido.

2.3 Métodos Típicos para Medição de Vazão

Existem diversos tipos de medidores de vazão, utilizando diversos princípios físicos diferentes. Segundo Miller (1996), a escolha do medidor ideal para cada caso é baseada em custos, tamanho da linha, fluido a ser medido, seu estado físico (gás, vapor, líquido), faixa de medição e precisão desejada. Nesta seção serão abordados os métodos mais usuais empregados na medição de vazão de fluidos.

De acordo com LaNasa & UPP (2014) e Miller (1996), os medidores por pressão diferencial são os mais usados devido a sua simplicidade e ao seu longo histórico de uso em diferentes aplicações. Este método consiste em dois elementos básicos: a restrição física, ou elemento primário, que é responsável por transformar a vazão em uma grandeza física mensurável, neste caso pressão; o elemento secundário que transforma essa grandeza obtida em uma forma de leitura do valor correspondente à vazão, neste caso um transdutor de pressão e seu condicionamento (DELMÉE, 1983; WEBSTER, 1999). Existem diferentes tipos de elementos primários causadores de queda de pressão, chamados elementos deprimogênios (DELMÉE, 1983), porém todos eles utilizam o mesmo princípio físico apoiado na equação de Bernoulli. Estes elementos podem ser normalmente placas de orifício, tubos de Venturi ou bocais de vazão. Esses medidores possuem poucas limitações de aplicação e são usados largamente tanto na medição de líquidos, como água, quanto de gases, como gás natural, além de hidrocarbonetos na indústria petrolífera (LANASA; UPP, 2014).

2.3.1 Placa de Orifício

O elemento deprimogênio mais usado é a placa de orifício, pois é o de mais simples construção, consistindo em uma placa metálica com um orifício que é inserida entre flanges com tomadas de pressão nas paredes do tubo (BAKER, 2005). Duas normas importantes referentes a esse método são a ISO 5167-1 e a ISO 5167-2. A placa de orifício (ver esboço na Figura 6) pode ser usada em dutos com diâmetro interno a partir de 50mm (2 polegadas), nesses casos é o método mais usado na medição de líquidos limpos, gases e vapores de baixa velocidade (MILLER, 1996). Para diâmetros menores que 50mm são necessários tipos especiais de instalação (DELMÉE, 1983).

A queda de pressão provocada pela placa de orifício se dá com o aumento da velocidade do fluido ao passar através do orifício de área menor que a do tubo. Dessa forma, o fluxo é comprimido até atingir um diâmetro mínimo conhecido como *vena contracta* (WEBSTER, 1999), conforme representado pelo esboço da Figura 7.

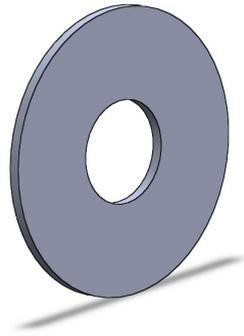


Figura 6: Esboço de uma placa de orifício.

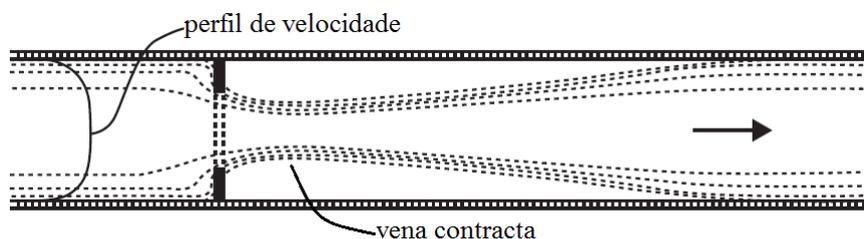


Figura 7: Representação da vazão através da placa de orifício. Fonte: LaNasa & Upp (2014).

Se a Equação (17) fosse usada para calcular a taxa de vazão em função da queda de pressão através da placa de orifício, então haveria um erro. Isso porque a A_2 teria que ser a área da *vena contracta*, que é desconhecida. Além disso, a turbulência causada pela placa de orifício resulta em uma perda de energia não prevista nesta equação (WEBSTER, 1999).

Para superar as limitações impostas pela aplicação experimental da Equação (17), dois fatores de correção empíricos são inseridos à essa equação: O coeficiente de descarga C e o fator de expansão do fluido ϵ . Para facilitar os cálculos é inserido um termo β que corresponde à razão entre o diâmetro do orifício e o diâmetro interno do tubo. Assim tem-se a Equação da vazão volumétrica de um fluido através de uma placa de orifício (Equação (28)) (WEBSTER, 1999):

$$Q = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \epsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (28)$$

onde Q é a vazão volumétrica [m^3/s], C é o coeficiente de descarga (adimensional), β é a razão entre diâmetros (adimensional), ϵ é o fator de expansão (adimensional), d é o diâmetro do orifício [m], p é a pressão do fluido [Pa] e ρ é a massa específica do fluido [kg/m^3].

O coeficiente de descarga C é afetado por variações na razão entre diâmetros, pelo número de Reynolds, pela rugosidade do tubo, pela borda do orifício e pelos pontos onde a pressão diferencial é medida. Porém, para uma geometria fixa, C depende apenas do número de Reynolds e pode, portanto, ser determinado para uma certa aplicação (WEBSTER, 1999). Ele pode ser determinado através de tabelas encontradas em normas reconhecidas internacionalmente ou calculado através de equações como, por exemplo, a Equação (29) (BAKER, 2005):

$$C = C_{\infty} + \frac{C_{Re}}{Re^n} \quad (29)$$

onde C_{∞} é o coeficiente para número de Reynolds infinito, C_{Re} é constante para uma instalação específica e Re é o Número de Reynolds baseado no diâmetro interno do tubo.

O fator de expansão ϵ considera a compressibilidade do fluido a ser medido. Ele depende da relação dos diâmetros β , do calor específico do gás e da relação das pressões medidas (DELMÉE, 1983). Também pode ser calculado, porém as longas equações não são práticas e, assim como o fator de descarga, pode ser determinado através de tabelas e gráficos encontrados em normas.

A relação entre os diâmetros β está intimamente ligada à pressão diferencial que será produzida, e é dada pela Equação (30):

$$\beta = \frac{d}{D} \quad (30)$$

onde d é o diâmetro do orifício [m] e D é o diâmetro interno do tubo [m].

Quanto maior o β , maior será a pressão diferencial medida entre os dois lados da placa, porém maior será a perda de carga no tubo. Portanto a escolha do β deve considerar a pressão diferencial que se deseja produzir e a perda de carga aceita no sistema. Um valor normalmente sugerido para β é de 0,5 (MILLER, 1996).

No sentido axial existem diversos critérios para o posicionamento das tomadas de pressão, baseados na praticidade de instalação e no diâmetro da tubulação (DELMÉE, 1983). A forma mais usada de tomadas de pressão é diretamente nos flanges que suportam a placa de orifício (*flange taps*). Esse tipo de instalação é recomendado para tubos com diâmetro de no mínimo 50 mm (2"). As vantagens são praticidade e normalização da distância entre tomadas independente do diâmetro da tubulação, além de menor custo.

Outro tipo de tomada de pressão é a tomada em *vena contracta* recomendada para tubulações de diâmetro maior que 500 mm. Esta tem a vantagem de ter maior precisão para extrapolação de dados que não constam em tabelas de coeficientes de descarga, porém sua desvantagem é que a distância da tomada de pressão a jusante da placa de orifício depende da relação β dos diâmetros, portanto perde em versatilidade. As tomadas em

canto (*corner taps*) podem ser usadas em casos com condições mais desfavoráveis que as demais, principalmente pela existência de tabelas de correção da rugosidade dos tubos.

Os outros tipos especificados na tabela são usados apenas em casos especiais como, por exemplo, quando se quer medir uma pressão diferencial menor que aquela existente na região próxima à placa de orifício (DELMÉE, 1983). A orientação das tomadas de pressão depende do estado físico do fluido a ser medido e de sua natureza, deve ser tal que qualquer componente indesejado na linha corrente não entre nas tomadas de pressão. Esses componentes indesejados podem ser impurezas no fluido, condensação de vapores, fases do fluido etc. (BAKER, 2005) A Figura 8 mostra a orientação adequada para cada caso.

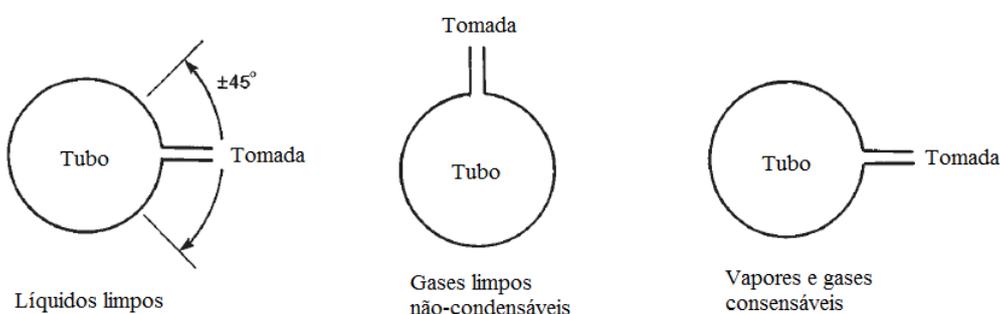


Figura 8: Orientação de tomadas de pressão. Fonte: (BAKER, 2005).

Normalmente para um escoamento de líquido na horizontal, as tomadas devem ser colocadas nos lados do tubo para que não sejam bloqueadas com impurezas ou bolhas de ar. Para escoamento de gases na horizontal, se o gás é limpo, as tomadas devem ser verticais. Para gases sujos ou vapores as tomadas devem estar nos lados do tubo (WEBSTER, 1999). O método da placa de orifício é o mais simples e mais barato dos medidores por pressão diferencial (WEBSTER, 1999), além de ser bastante robusto exigindo baixíssima manutenção a não ser em condições adversas, como no uso em fluidos corrosivos ou temperaturas extremas (DELMÉE, 1983). Apesar de suas vantagens que garantem seu uso expressivo em todos os setores, também apresenta desvantagens. Seu uso implica em uma perda de carga considerável no sistema, já que insere uma obstrução no fluxo, isso pode ser indesejado em casos com custos de bombeamento elevados (LANASA; UPP, 2014). Além disso, apresenta baixa largura de faixa, ou seja, pequenos intervalos entre vazão mínima e vazão máxima, comparado a outros métodos (DELMÉE, 1983). Além disso a placa pode gerar áreas de turbulência no fluido tornando o seu comportamento mais imprevisível em certos pontos, portanto é mais suscetível a ruídos

2.3.2 Tubo de Venturi

O tubo de Venturi é o tipo mais antigo de medidor por diferencial de pressão, o primeiro trabalho sobre esse medidor foi desenvolvido por G.B. Venturi em 1797. Somente 90 anos depois Clemens Herschel desenvolveu o tubo de Venturi como aplicação industrial, tendo sido usado em 1887 (MILLER, 1996). Como mostrado na figura 9, a restrição é inserida na linha de corrente de forma mais gradual comparada à placa de orifício.

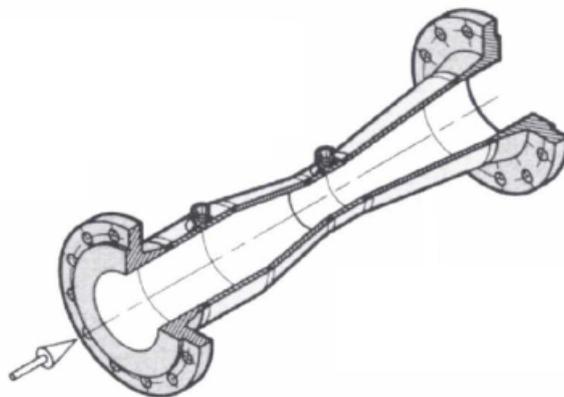


Figura 9: Tubo de venturi Clássico. Fonte: (BAKER, 2005).

A diferença principal entre este elemento primário de vazão e a placa de orifício é que, no primeiro a veia fluida acompanha as paredes do tubo em todo o trajeto, enquanto no segundo existe um "colchão" de fluido entre as paredes do tubo e a veia fluida formado por redemoinhos (DELMÉE, 1983) A vazão é mais próxima à descrita pela Equação (17) resultando em coeficientes de descarga mais próximos a 1. Além disso, a perda de carga causada pelo tubo de Venturi é mais baixa, porém a pressão diferencial produzida também é mais baixa comparando a uma placa de orifício com mesma relação de diâmetros β (WEBSTER, 1999).

O tubo de Venturi é formado por três partes principais representadas na Figura 9: O cone de entrada, destinado a aumentar progressivamente a velocidade do fluido, a parte intermediária cilíndrica, onde se faz a medição de baixa pressão, e o cone de saída que diminui progressivamente a velocidade do fluido até ser igual à de entrada (DELMÉE, 1983). A Figura 10 apresenta um esboço de um tubo de Venturi com suas principais partes.

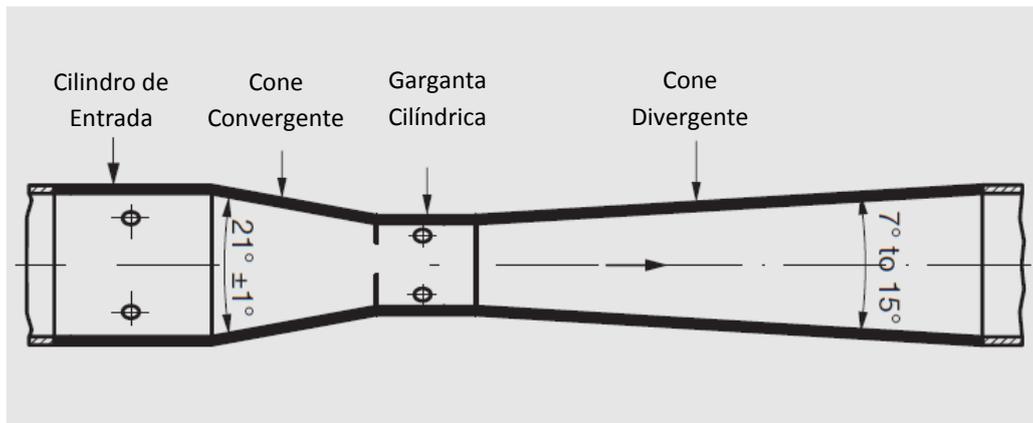


Figura 10: Composição do Tubo de venturi. Fonte: adaptado de ABB (2011).

Esse método é indicado para fluidos sujos ou com sólidos em suspensão. Devido à sua construção com linhas suaves, não há acúmulo de impurezas, portanto é menos sensível a erosão e entupimentos comparado à placa de orifício. Também é preferencial para casos em que os custos de bombeamento sejam altos, já que a perda de carga é menor que na placa de orifício (BAKER, 2005). O tubo de Venturi também é menos sensível a distúrbios no fluxo, portanto necessitam de menores comprimentos de tubo à montante do medidor.

As maiores desvantagens são o tamanho e o custo da instalação. É mais difícil e portanto mais caro de se produzir do que a placa de orifício. Como o tubo de Venturi pode ter tipicamente 6 diâmetros de comprimento, sua instalação e sua manutenção pode não ser prática (WEBSTER, 1999).

2.3.3 Bocais de Vazão

O bocal de vazão combina características da placa de orifício e do tubo de Venturi, é compacto e ainda assim apresenta coeficiente de descarga próximo à unidade (WEBSTER, 1999). A perda de carga residual provocada por sua inserção na linha e seu custo são intermediários entre a placa de orifício e o tubo de Venturi. A Figura 11 mostra um esboço de um bocal de vazão típico.

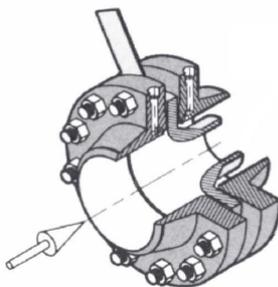


Figura 11: Bocal de vazão entre flanges. Fonte: (BAKER, 2005).

Existem diversos modelos de bocais de vazão, porém os mais usados são o padrão ISA, usado na Europa, e o padrão ASME, nos Estados Unidos, que possui um perfil de entrada elíptica. Além do perfil de entrada, os dois padrões diferem no posicionamento das tomadas de pressão. O padrão ISA prevê a colocação de tomadas de canto (*corner taps*), enquanto no padrão ASME as tomadas são do tipo D e 1/2D. O perfil suave dos bocais de vazão permite sua aplicação em fluidos abrasivos ou corrosivos. Esse método também é recomendado em vazões de alta velocidade que requerem um valor de β acima de 0,75, onde a placa de orifício não é recomendada (BAKER, 2005).

2.4 Conceitos Básicos sobre Medição de Pressão

Além do gerador de pressão diferencial, o outro elemento principal de um medidor de vazão é o transdutor de pressão necessário para medir a queda de pressão causada pelo elemento primário. A escolha e instalação corretas do transdutor de pressão são fundamentais para se determinar a precisão do medidor de vazão (WEBSTER, 1999).

Os principais fatores a serem considerados na escolha de um transdutor de pressão diferencial são a faixa de pressão diferencial a ser medida, a precisão exigida, a máxima pressão na tubulação, e o tipo e temperatura do fluido a ser medido.

A maioria dos sensores modernos consiste em um sensor encapsulado em que técnicas de capacitância ou extensimetria são usadas para detectar o movimento de um diafragma. Utilizando essas técnicas, pode-se obter uma precisão típica de $\pm 0,1\%$ do fundo de escala. Quanto à instalação, o transdutor deve ser posicionado o mais próximo possível do gerador de pressão diferencial. Isso ajuda a garantir uma resposta dinâmica rápida e reduz problemas causados por vibrações nas tubulações (WEBSTER, 1999).

2.4.1 Definições de Pressão

Pressão é definida como a força normal por unidade de área exercida por um fluido em uma superfície. Apenas a componente normal à superfície é considerada para se determinar a pressão. A pressão é uma grandeza escalar e não vetorial, portanto é não-direcional (WEBSTER, 1999).

A medição de pressão pode ser dividida em três formas: pressão absoluta, pressão manométrica e pressão diferencial. A pressão absoluta representa a diferença de pressão entre um ponto de medição e o vácuo perfeito onde a pressão é zero. A pressão manométrica é a diferença entre um ponto e a pressão ambiente (atmosférica). A pressão diferencial é a diferença de pressão entre dois pontos de pressão desconhecida, de novo

apenas a diferença entre os pontos interessa (WEBSTER, 1999).

A unidade de pressão no SI é o *pascal* (Pa), que é definido como newton por metro quadrado (N/m^2). O pascal é uma unidade muito pequena de pressão, assim são usados múltiplos de pascal como por exemplo *quilopascal* (kPa). Outras unidades mais práticas costumam ser usadas para se lidar com pressão como o *bar* ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$) e o *psi* (*pound force per square inch*) que equivale a cerca de 6,90 kPa. As pressões absoluta, manométrica e diferencial podem ser representadas em psi como *psia*, *psig* (*gage*) e *psid* respectivamente.

2.4.2 Conceitos Básicos sobre Sensores de Pressão

Segundo Webster (1999), o princípio básico dos transdutores de pressão é medir a pressão através da deformação de um elemento mecânico elástico causada pela pressão exercida pelo fluido. Um método de detecção é necessário para transformar a deformação do elemento sensor em uma saída de pressão. Para isso existem diversos métodos, podendo ser puramente mecânicos ou eletromecânicos.

Os sensores de pressão mais comuns são os piezoresistivos (ou sensores *strain-gage*), que utilizam o efeito de variação de resistência elétrica em função da deformação do elemento sensor para medir a pressão exercida pelo fluido a ser medido (WEBSTER, 1999). O efeito piezoresistivo é descrito por Webster (1999) como uma mudança na resistência elétrica de um material quando um esforço é aplicado. Este efeito é explorado fixando tal material a um diafragma, situado dentro do sensor, dividindo duas câmaras às quais são aplicadas duas pressões diferentes, cuja diferença se quer medir. Assim, uma diferença entre as pressões provoca uma deformação do diafragma e portanto uma mudança na resistência elétrica do elemento sensor. A maioria dos sensores piezoresistivos consiste de circuitos integrados utilizando diafragmas de silício contendo elementos piezoresistivos.

Outro tipo de sensor é o capacitivo. Neste caso, um dos eletrodos do elemento capacitivo está situado no diafragma sujeito a deformação em função da pressão exercida pelo fluido, enquanto o outro eletrodo é estacionário. Desta forma, há uma variação na capacitância em função da pressão com a variação da distância entre os eletrodos (WEBSTER, 1999).

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo são detalhadas as etapas de desenvolvimento do protótipo de medição proposto neste trabalho. São apresentados os métodos utilizados para projetar o sistema, e os testes experimentais realizados no projeto do protótipo e na validação das medições. Um diagrama de blocos representando o sistema proposto neste trabalho é apresentado na Figura 12.

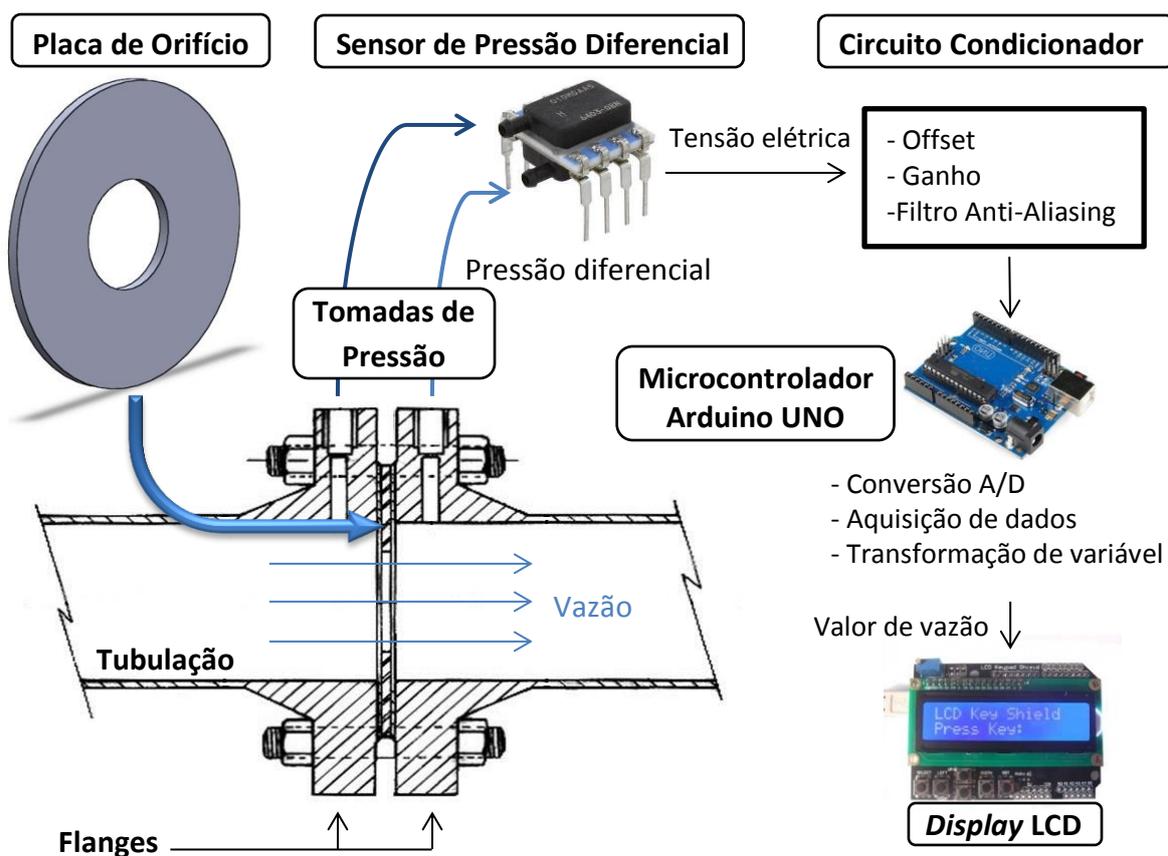


Figura 12: Diagrama de blocos do sistema de medição proposto.

O sistema utiliza o método de medição de vazão por pressão diferencial descrito anteriormente na Seção 2.3, contendo uma placa de orifício como elemento primário, que

provoca uma queda de pressão do ar que passa através do orifício. Essa pressão diferencial é conduzida através de tomadas de pressão, situadas nos flanges que comportam a placa de orifício, e transformada em um valor de tensão elétrica através do sensor piezoresistivo de pressão diferencial. O sinal de tensão elétrica, gerado no transdutor de pressão e condicionado, é então adquirido usando uma placa microcontrolada (Arduino UNO), que interpreta esse sinal transformando-o em um valor numérico de vazão utilizando a função de transferência experimental obtida no processo de calibração. Por fim, o valor de vazão medido é mostrado em um *display* LCD usado como interface com o usuário.

3.1 Desenvolvimento do Sistema de Medição

Nesta seção são descritos os procedimentos de projeto do sistema de acordo com os métodos indicados no Capítulo 2, bem como sua construção.

3.1.1 Desenvolvimento da Placa de Orifício

As dimensões da placa de orifício foram definidas baseadas na Equação da vazão volumétrica através da placa de orifício apresentada na Seção 2.3.1 e novamente na Equação (31):

$$Q = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \epsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (31)$$

onde Q é a vazão volumétrica [m^3/s], C é o coeficiente de descarga (adimensional), β é a razão entre diâmetros (adimensional), ϵ é o fator de expansão (adimensional), d é o diâmetro do orifício [m], p é a pressão do fluido [Pa], ρ é a massa específica do fluido [kg/m^3].

Para tanto, foram fixados os valores de algumas das variáveis, de acordo com as necessidades do sistema, deixando livres os parâmetros β (razão entre os diâmetros do tubo e do orifício) e Δp (pressão diferencial). Desta forma, usando as recomendações da literatura e através de cálculos iterativos, foi definido o diâmetro do orifício, além da pressão diferencial esperada produzida na placa de orifício.

Primeiramente, foi definida a faixa de vazão teórica que o sistema deve medir (10 a 50 mm^3/h), de acordo com a proposta do medidor e com o equipamento disponível para calibração, o medidor de vazão Contech SVTG25/25 com faixa de medição de 8,5 a 85 m^3/h e erro de linearidade de $\pm 1\%$. Em seguida, foi escolhido o diâmetro do tubo que conduz o ar e comporta a placa de orifício. Foi definido um tubo de diâmetro 2" (diâmetro interno de 52,6 mm), pois é o diâmetro mínimo recomendado para o uso do método da

placa de orifício com tomadas de pressão em flange, segundo Miller (1996).

O coeficiente de descarga C e o fator de expansão ϵ foram determinados a partir de tabelas encontradas na norma ISO 5167-2:2003. Dessa forma chegou-se a valores de coeficiente de descarga de 0,6163 e de fator de expansão 0,9936. Para o coeficiente de descarga foi usada a tabela "Table A.3 - Orifice plate with flange tappings - Discharge coefficient, C , for $D = 50\text{mm}$ ", o trecho usado é apresentado na Tabela 2. Para o fator de expansão foi usada a tabela "Table A.12 - Orifice plates - Expansibility [expansion] factor, ϵ ", o trecho é apresentado na Tabela 3.

Tabela 2: Coeficiente de descarga para placa de orifício com tomadas em flange.

Diameter ratio β	Discharge coefficient, C , for Re_D equal to											
	5×10^3	1×10^4	2×10^4	3×10^4	5×10^4	7×10^4	1×10^5	3×10^5	1×10^6	1×10^7	1×10^8	∞
0,25	0,610 2	0,606 9	0,604 8	0,604 0	0,603 2	0,602 9	0,602 5	0,601 9	0,601 6	0,601 4	0,601 3	0,601 2
0,26	0,610 6	0,607 1	0,605 0	0,604 1	0,603 3	0,602 9	0,602 6	0,602 0	0,601 6	0,601 4	0,601 3	0,601 2
0,28	0,611 4	0,607 6	0,605 3	0,604 4	0,603 5	0,603 1	0,602 8	0,602 1	0,601 7	0,601 4	0,601 3	0,601 2
0,30	0,612 3	0,608 2	0,605 7	0,604 7	0,603 8	0,603 4	0,603 0	0,602 2	0,601 8	0,601 5	0,601 4	0,601 3
0,32	0,613 2	0,608 9	0,606 2	0,605 2	0,604 2	0,603 7	0,603 2	0,602 4	0,601 9	0,601 6	0,601 4	0,601 3
0,34	0,614 3	0,609 7	0,606 8	0,605 6	0,604 5	0,604 0	0,603 5	0,602 6	0,602 1	0,601 7	0,601 6	0,601 4
0,36	0,615 5	0,610 5	0,607 4	0,606 2	0,605 0	0,604 4	0,603 9	0,602 9	0,602 3	0,601 9	0,601 7	0,601 6
0,38	0,616 9	0,611 5	0,608 1	0,606 8	0,605 5	0,604 9	0,604 3	0,603 2	0,602 6	0,602 1	0,601 9	0,601 7
0,40	0,618 4	0,612 5	0,608 9	0,607 5	0,606 1	0,605 4	0,604 8	0,603 6	0,602 9	0,602 3	0,602 1	0,601 9
0,42	0,620 0	0,613 7	0,609 8	0,608 2	0,606 8	0,606 0	0,605 4	0,604 1	0,603 3	0,602 6	0,602 3	0,602 1
0,44	0,621 9	0,615 0	0,610 8	0,609 1	0,607 5	0,606 7	0,606 0	0,604 5	0,603 7	0,602 9	0,602 6	0,602 3
0,46	0,623 9	0,616 4	0,611 9	0,610 0	0,608 3	0,607 4	0,606 7	0,605 1	0,604 1	0,603 3	0,602 9	0,602 6
0,48	0,626 0	0,618 0	0,613 0	0,611 0	0,609 2	0,608 2	0,607 4	0,605 7	0,604 6	0,603 6	0,603 2	0,602 8
0,50	0,628 4	0,619 6	0,614 3	0,612 1	0,610 1	0,609 1	0,608 2	0,606 3	0,605 1	0,604 0	0,603 6	0,603 1
0,51	0,629 7	0,620 5	0,614 9	0,612 7	0,610 6	0,609 5	0,608 6	0,606 6	0,605 4	0,604 2	0,603 7	0,603 3
0,52	0,631 0	0,621 4	0,615 6	0,613 3	0,611 1	0,610 0	0,609 0	0,606 9	0,605 6	0,604 4	0,603 9	0,603 4
0,53	0,632 4	0,622 4	0,616 3	0,613 9	0,611 6	0,610 5	0,609 4	0,607 3	0,605 9	0,604 6	0,604 1	0,603 5
0,54	0,633 8	0,623 4	0,617 1	0,614 5	0,612 2	0,610 9	0,609 9	0,607 6	0,606 2	0,604 8	0,604 2	0,603 7

Fonte: Adaptado de ISO5167-2:2003.

Tabela 3: Fator de expansão para placa de orifício.

Diameter ratio		Expansibility [expansion] factor, ϵ , for p_2/p_1 equal to							
β	β^4	0,98	0,96	0,94	0,92	0,90	0,85	0,80	0,75
for $\kappa = 1,2$									
0,100 0	0,000 1	0,994 1	0,988 3	0,982 4	0,976 4	0,970 5	0,955 5	0,940 4	0,925 2
0,562 3	0,100 0	0,993 6	0,987 1	0,980 6	0,974 1	0,967 6	0,951 1	0,934 5	0,917 7
0,668 7	0,200 0	0,992 7	0,985 3	0,977 9	0,970 5	0,963 1	0,944 3	0,925 4	0,906 3
0,740 1	0,300 0	0,991 5	0,982 9	0,974 3	0,965 7	0,957 0	0,935 2	0,913 2	0,891 0
0,750 0	0,316 4	0,991 2	0,982 4	0,973 6	0,964 8	0,955 9	0,933 5	0,910 9	0,888 1

Fonte: Adaptado de ISO5167-2:2003.

Com estes valores estabelecidos, foi escolhido o fator β inicialmente de 0,5 seguindo

recomendação de Miller (1996). Após ajustes através de cálculos iterativos, já que β está intimamente ligado à pressão diferencial Δp e obviamente com o diâmetro do orifício, foi definido o diâmetro do orifício com 28 mm . Dessa forma, o valor final de β foi fixado em 0,5323.

A partir daí, foram calculados os valores teóricos da pressão diferencial produzida com vazão máxima e mínima. Com vazão mínima de $10 \text{ mm}^3/h$, a pressão diferencial Δp calculada é de $31,44 \text{ Pa}$. Com vazão máxima de $50 \text{ mm}^3/h$, a pressão diferencial calculada é de $785,97 \text{ Pa}$. Com estes valores determinados, foi feita a escolha do sensor de pressão diferencial adequado à essa faixa.

A fim de facilitar o encaixe da placa de orifício entre os flanges e garantir o alinhamento do orifício com o centro do tubo, foi feito um ressalto na placa que se encaixa em um rebaixo nos flanges. O resultado final é ilustrado no modelo desenvolvido no *software* SolidWorks 2013 na Figura 13(a) e na Figura 13(b) com uma foto da placa desenvolvida.

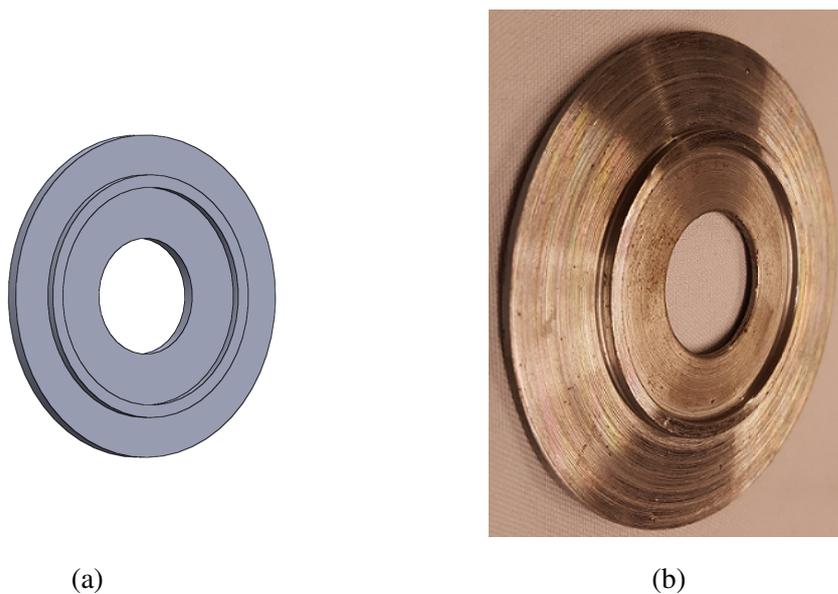


Figura 13: Placa de orifício desenvolvida: (a) modelo da placa de orifício projetada e (b) foto da placa de orifício desenvolvida.

A placa de orifício foi feita a partir de uma chapa de aço ASTM-A-36 laminado a quente de 8 mm de espessura. Foi feita a usinagem da peça em um torno mecânico atingindo as dimensões especificadas no desenho da placa de orifício apresentado no Anexo A.

3.1.2 Descrição da Tubulação e dos Flanges

Para conduzir o ar até a placa de orifício foi usado um tubo de aço DIN-2440 galvanizado, de diâmetro DN50 (diâmetro nominal 50mm). O tubo foi soldado aos flanges que comportam a placa de orifício. Os dois flanges são fixados entre si por quatro parafusos com porca. O comprimento do tubo usado a jusante e a montante da placa de orifício foi definido de acordo com a norma ISO-5167-2 e de acordo com as recomendações da literatura (MILLER, 1996), para estabilizar o fluxo de ar. Usando os critérios estabelecidos e arredondando valores para cima por praticidade na construção, foram determinados os comprimentos de $80\text{cm} \pm 2\text{mm}$ a montante da placa de orifício e $30\text{cm} \pm 2\text{mm}$ a jusante.

Os flanges usados para acomodar a placa de orifício são flanges de pescoço forjados em aço ASTM-A-105. Além de acomodar a placa de orifício, os flanges contém as tomadas de pressão inseridas na configuração de tomadas em flange (*flange-taps*), de acordo com norma ISO-5167-2. Para isso, foi feito um furo em cada flange até o interior do tubo e adicionada uma rosca NPT 1/8" para a conexão das mangueiras que conectam o sensor de pressão diferencial ao fluxo a ser medido. Os flanges contam com um rebaixo onde a placa de orifício se encaixa, além de uma ranhura para a instalação de anéis de borracha (*o-rings*) para vedação. Na Figura 14 é apresentado o desenho de um corte longitudinal do conjunto de flanges e placa de orifício. Uma foto do conjunto aberto expondo a placa de orifício é apresentada na Figura 15. Os desenhos da placa de orifício e dos flanges são apresentados nos Anexos A e B.

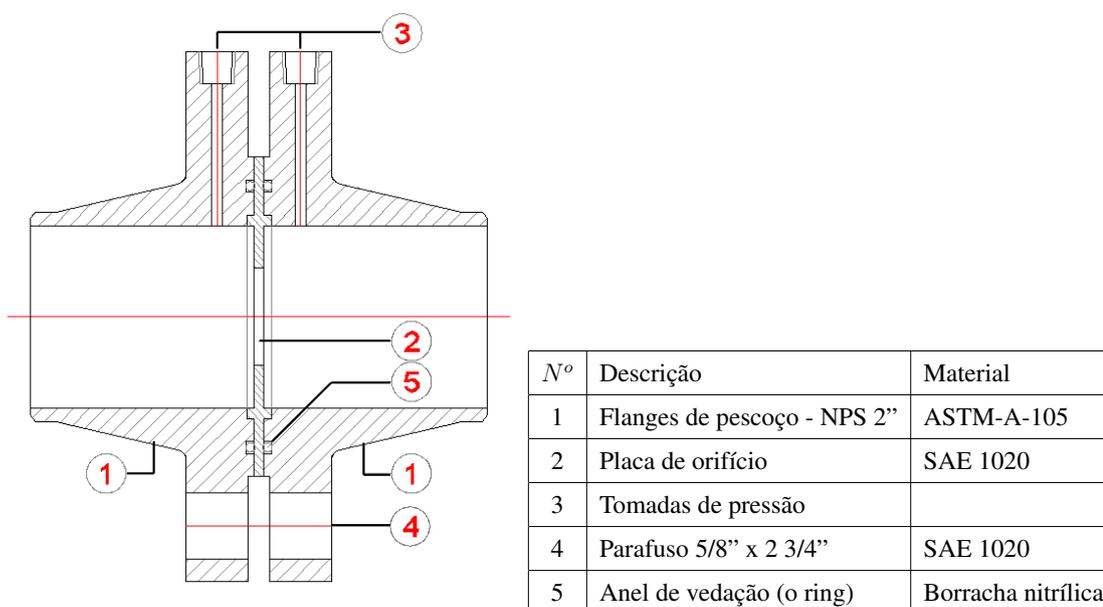


Figura 14: Desenho do conjunto de flanges e da placa de orifício.

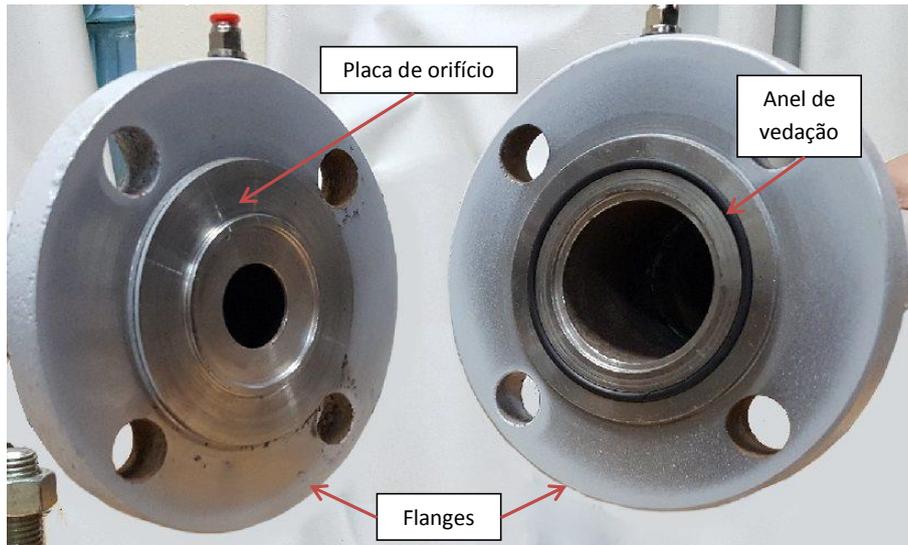


Figura 15: Conjunto de flanges desmontado.

3.1.3 Descrição do Sensor de Pressão Diferencial

O sensor de pressão usado neste projeto é um sensor piezoresistivo fabricado pela empresa Honeywell modelo HSCDRRN005NDAA5 com faixa de entrada de $\pm 1245,41 Pa$, escolhido a partir dos cálculos efetuados no dimensionamento da placa de orifício.

O sensor é acoplado fisicamente ao fluxo de ar através de mangueiras plásticas flexíveis conectadas às tomadas de pressão utilizando conectores de engaste rápido BSP, conforme apresentado na Figura 16. O sensor possui duas entradas de ar, uma recebe a pressão da tomada a montante da placa de orifício, e a outra recebe a pressão a jusante da placa, portanto, obtém uma medida de pressão diferencial. Dessa forma, o sensor gera uma saída em tensão elétrica proporcional à diferença de pressão entre as duas entradas.

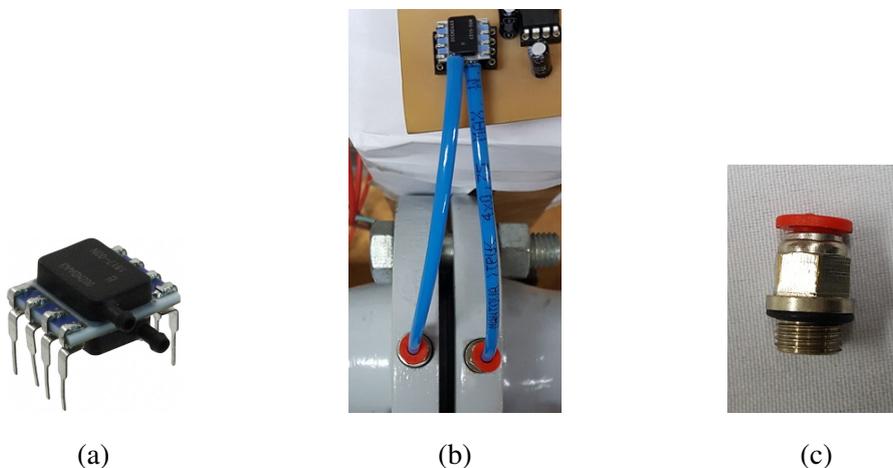


Figura 16: Acoplamento do sensor de pressão diferencial às tomadas de pressão: (a) sensor de pressão, (b) sensor instalado e (c) Conector BSP.

A função de transferência deste sensor, fornecida pelo fabricante, é dada pela Equação (32):

$$V_{out} = \frac{0,8 \cdot V_{supply}}{P_{max} - P_{min}} (P_{aplicada} - P_{min}) + 0,10 \cdot V_{supply} \quad (32)$$

onde V_{out} é a tensão elétrica de saída [V], V_{supply} é a tensão elétrica de alimentação [V], P_{max} é a pressão máxima da faixa de entrada [Pa], P_{min} é a pressão mínima da faixa de entrada [Pa] e $P_{aplicada}$ é a pressão aplicada ao sensor [Pa]. O sensor é alimentado usando uma referência de tensão de $5V \pm 5mV$ presente na placa microcontrolada Arduino UNO usada na aquisição de dados.

3.2 Descrição do Circuito Condicionador

O circuito condicionador tem as funções de elevar a faixa de saída experimental do sensor de pressão diferencial de 2,6V a 3,5V para 0V a 5V através de um bloco de *offset* seguido de um bloco de ganho, e aplicar um filtro passa-baixas *anti-aliasing*. Dessa forma, é usada toda a faixa de entrada do conversor A/D e são atenuadas as altas frequências que possam produzir efeito de *aliasing* e ruído. O circuito condicionador é alimentado com tensão elétrica simétrica de 9V. Todos os resistores usados possuem tolerância de 1%. Um diagrama de blocos do circuito condicionador é apresentado na Figura 17. O diagrama esquemático do circuito condicionador completo é apresentado no Anexo C.

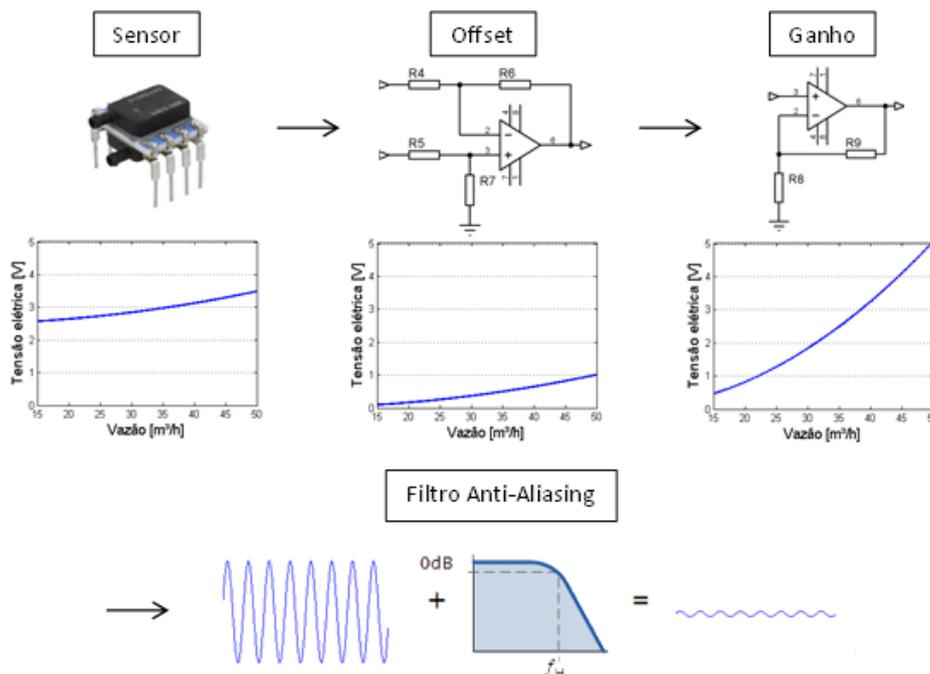


Figura 17: Diagrama de blocos do circuito condicionador.

3.2.1 Circuito de *Offset*

O circuito de *offset* desloca a tensão elétrica de saída do sensor em $-2,5V$ para que o valor mínimo de vazão corresponda ao valor mínimo de tensão elétrica de entrada do conversor *A/D*. Isso é feito usando um circuito na configuração de subtrator. A tensão elétrica de $2,5V$ aplicada à entrada negativa do subtrator (V_{sub}) é obtida a partir de um divisor de tensão elétrica alimentado pela tensão elétrica de referência de $5V$ (V_{REF}) com um *buffer* usado para garantir o nível de $2,5V$. Um diagrama esquemático do circuito de *offset* é apresentado na Figura 18:

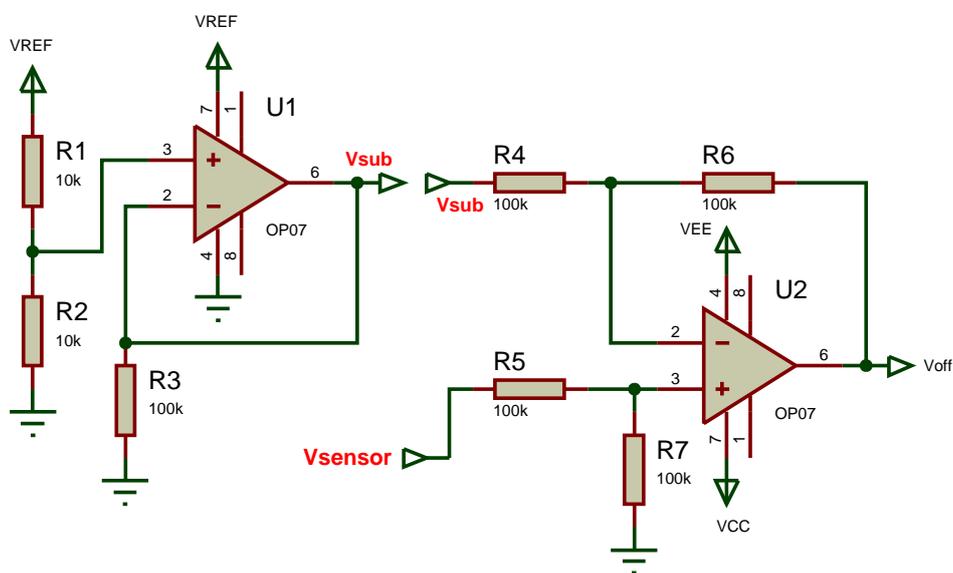


Figura 18: Diagrama esquemático do circuito de *offset*.

Dessa forma a tensão elétrica de deslocamento $V_{sub}[V]$ é dada pela Equação (33):

$$V_{sub} = V_{REF} \frac{R2}{R1 + R2} = 5V \frac{10k\Omega}{10k\Omega + 10k\Omega} = 2,5V \quad (33)$$

e a tensão elétrica de saída após o bloco de *offset* é determinada pela Equação (34):

$$V_{off} = V_{sensor} - V_{sub} = V_{sensor} - 2,5V \quad (34)$$

onde V_{off} é a tensão de saída do bloco de *offset* [V] e V_{sensor} é a tensão elétrica de saída [V] do sensor de pressão.

3.2.2 Estágio de Amplificação

A fim de elevar a tensão elétrica do sinal de saída do bloco de *offset*, é adicionado um bloco de ganho. Foi escolhido um ganho de 5 de modo a elevar a tensão elétrica máxima

a $5V$, correspondente à tensão elétrica máxima de entrada do conversor A/D. Isso é feito através do circuito apresentado na Figura 19:

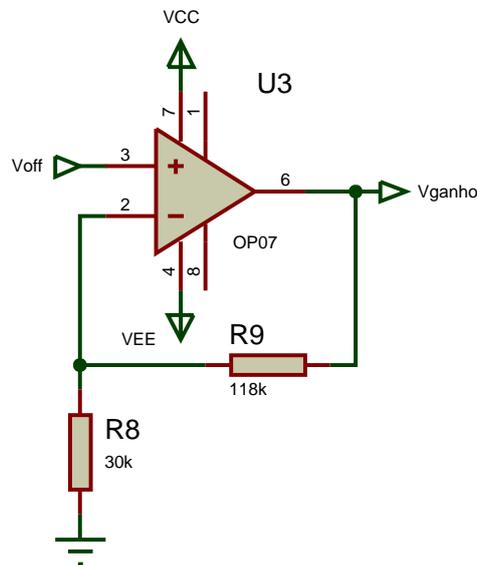


Figura 19: Diagrama esquemático do circuito de amplificação.

A saída do bloco de ganho é indicada pela Equação (35):

$$V_{ganho} = \left(\frac{R9}{R8} + 1 \right) V_{off} \quad (35)$$

onde V_{ganho} é a tensão elétrica de saída do estágio de ganho [V] e V_{off} é a tensão elétrica de saída do bloco de *offset* [V]. Portanto o ganho pode ser calculado através da Equação (36):

$$G = \frac{R9}{R8} + 1 = \frac{118k\Omega}{30k\Omega} + 1 = 4,93 \quad (36)$$

Nota-se que o ganho de 4,93 do circuito implementado é um pouco menor que o ganho escolhido inicialmente de 5. Esse ajuste foi feito para que a saída não ultrapasse o limite máximo do conversor A/D de $5V$.

3.2.3 Circuito de Filtragem *Anti-Aliasing*

Para que o sinal de tensão elétrica de saída do circuito condicionador possa ser digitalizado com fidelidade pelo conversor A/D, é necessário que este sinal passe por um filtro *anti-aliasing*. O filtro consiste em um filtro passa-baixas com frequência de corte que deve ser superior à frequência do fenômeno a ser medido e, ao mesmo tempo, de tal valor que as componentes espectrais indesejadas sofram atenuação de, ao menos, 40 dB.

Para tanto, foi projetado um filtro *Butterworth* passa-baixas de quarta ordem na configuração *Sallen-Key*, com ganho unitário e com frequência de corte igual a $36Hz$ garan-

tindo a atenuação de possível ruído com frequência da rede elétrica de $60Hz$. Isso foi feito com o auxílio do *software* FilterPro Desktop 3.1.0 da empresa Texas Instruments. O circuito projetado é apresentado na Figura 20:

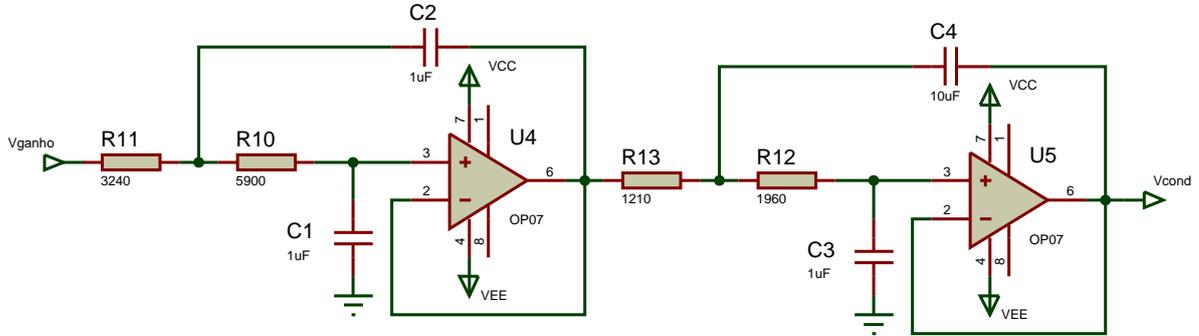


Figura 20: Diagrama esquemático do circuito de ganho.

As funções de transferência de cada estágio do filtro são dadas pelas Equações (37), (38), (39) e (40):

$$H_1(s) = \frac{1}{R_{11}R_{10}C_1C_2} \frac{1}{s^2 + s \left(\frac{1}{R_{11}C_2} + \frac{1}{R_{10}C_2} \right) + \frac{1}{R_{11}R_{10}C_1C_2}} \quad (37)$$

$$H_2(s) = \frac{1}{R_{13}R_{12}C_3C_4} \frac{1}{s^2 + s \left(\frac{1}{R_{13}C_4} + \frac{1}{R_{12}C_4} \right) + \frac{1}{R_{13}R_{12}C_3C_4}} \quad (38)$$

$$H_1(s) = \frac{52312,199}{s^2 + 478,133s + 52312,199} \quad (39)$$

$$H_2(s) = \frac{42165,627}{s^2 + 133,665s + 42165,627} \quad (40)$$

Então, a função de transferência total do filtro é dada pelas Equações (41) e (42):

$$H(s) = H_1(s) \cdot H_2(s) \quad (41)$$

$$H(s) = \frac{2,206 \cdot 10^9}{s^4 + 611,8s^3 + 1,584 \cdot 10^5s^2 + 2,715 \cdot 10^7s + 2,206 \cdot 10^9} \quad (42)$$

O diagrama de Bode do filtro é apresentado na Figura 21.

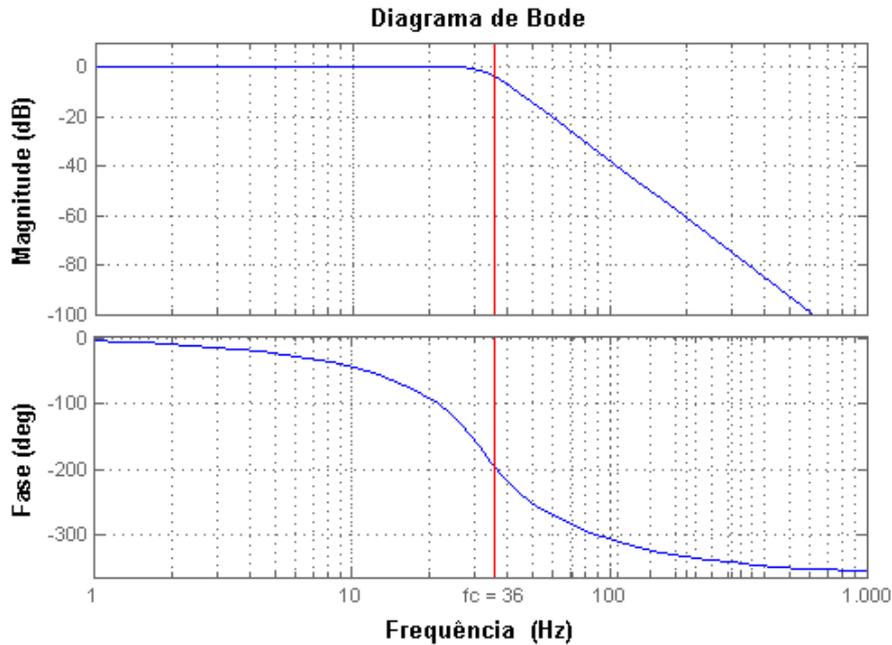


Figura 21: Diagrama de Bode do filtro *anti-aliasing*.

3.3 Função de Transferência Teórica do Sistema

A partir da Equação (31), que relaciona vazão e pressão diferencial, associada à função de transferência do sensor de pressão, Equação (32), que relaciona a tensão de saída com a pressão aplicada, pode-se calcular a função de transferência teórica do sensor de pressão em função da vazão. Isolando a pressão aplicada em cada uma das equações e as igualando, obtém-se a Equação (43):

$$\frac{V_{sensor} - 0,10 \cdot V_{supply}}{0,8 \cdot V_{supply}} \cdot (P_{max} - P_{min}) + P_{min} = \frac{16(Q/3600)^2 \cdot (1 - \beta^4) \cdot \rho}{2 \cdot C^2 \cdot \epsilon^2 \cdot \pi^2 \cdot d^4} \quad (43)$$

onde V_{sensor} é a tensão elétrica de saída do sensor [V], V_{supply} é a tensão elétrica de alimentação [V], P_{max} é a pressão máxima da faixa de entrada [Pa], P_{min} é a pressão mínima da faixa de entrada [Pa], Q é a vazão volumétrica [m^3/h], β é a razão entre diâmetros (adimensional), ρ é a massa específica do fluido [kg/m^3], C é o coeficiente de descarga (adimensional), ϵ é o fator de expansão (adimensional) e d é o diâmetro do orifício [m].

Substituindo os valores na Equação (43), deixando a tensão elétrica de saída em função da vazão, tem-se a Equação (44), que representa a tensão elétrica de saída do sensor em função da vazão:

$$V_{sensor} = 0,00048 \cdot Q^2 + 2,375 \quad (44)$$

onde V_{sensor} é a tensão elétrica de saída do sensor [V] e Q é a vazão volumétrica [m^3/h].

O sistema ainda conta com o circuito condicionador que provoca um deslocamento de 2,5V na tensão de saída do sensor e a amplifica em 4,93 vezes. Portanto o deslocamento e ganho são adicionados à função desta forma $V_{out} = (V_{sensor} - 2,5) \cdot 4,93$ para se obter a função de transferência teórica do sistema completo apresentada na Equação (45):

$$V_{out} = 0,0024 \cdot Q^2 - 0,625 \quad (45)$$

onde V_{out} é a tensão de saída do sistema e Q é a vazão volumétrica [m^3/h]. A Figura 22 apresenta a cadeia de medidas proposta para o sistema desenvolvido.

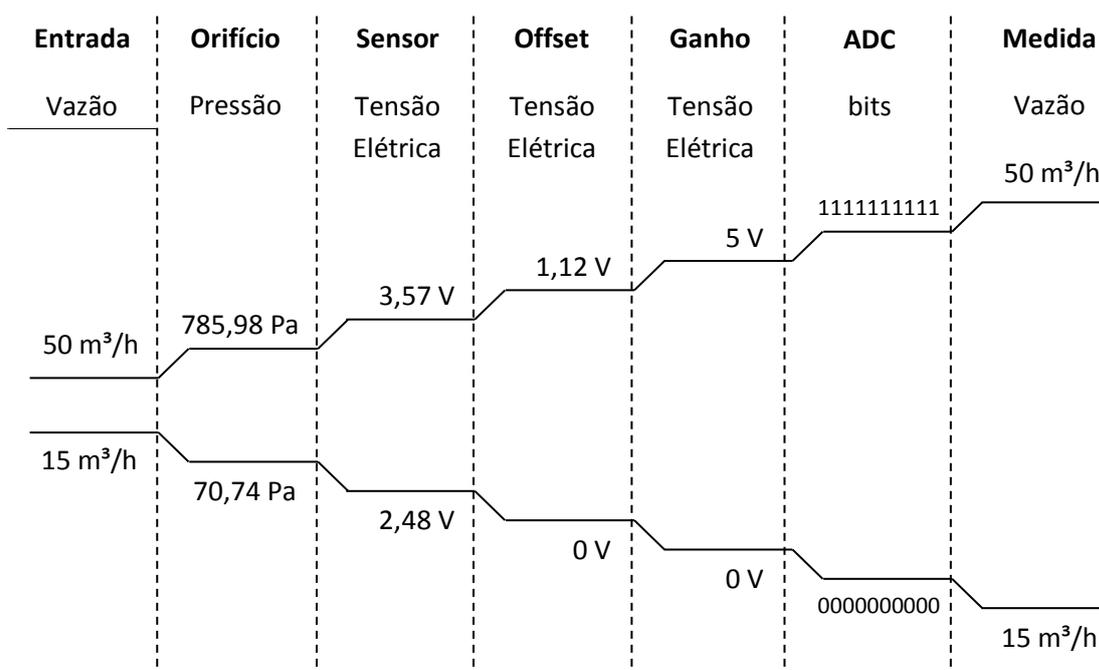


Figura 22: Cadeia de medidas proposta do sistema.

3.4 Descrição do Sistema de Aquisição de Dados com Arduino UNO

A fim de obter e interpretar o sinal de tensão elétrica gerado no sensor de pressão, é usada a plataforma comercial Arduino UNO que conta com o microcontrolador ATmega 328 fabricado pela empresa Atmel, a Figura 23 apresenta um diagrama de blocos da parte de aquisição de sinal do sistema.

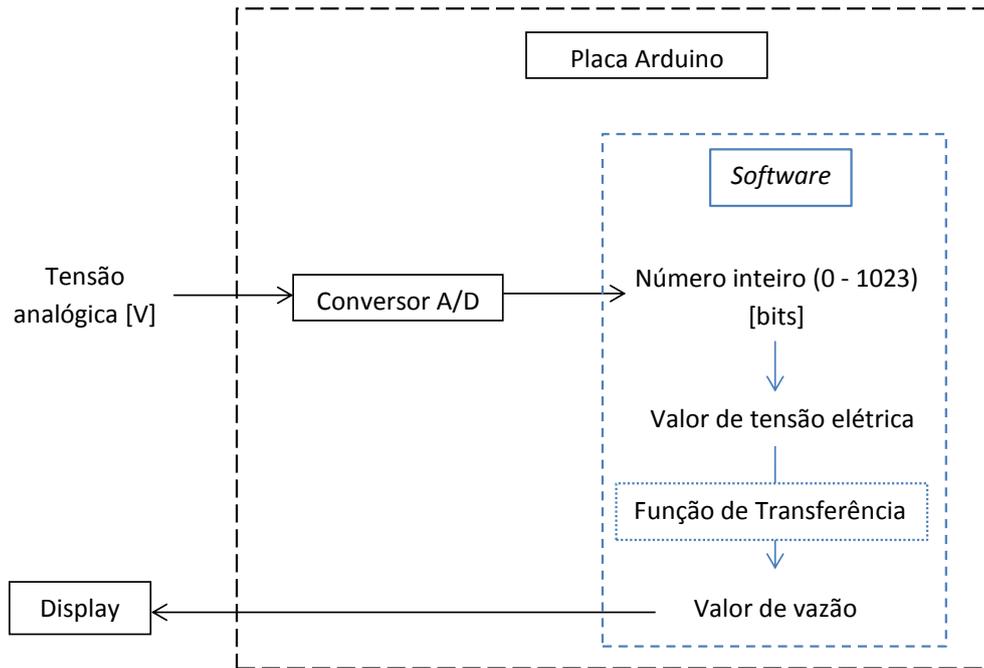


Figura 23: Diagrama de blocos da aquisição de dados do sistema.

Para isso, o sinal analógico de tensão elétrica é convertido em um sinal digital através de conversor A/D de 10 bits. A entrada do conversor recebe um sinal analógico de 0 a 5V, enquanto a saída entrega um sinal digital de valor entre 0 e 1023 proporcional à entrada, de acordo com a Equação (46):

$$V_{digital} = \frac{V_{analógico}}{5} \cdot 1023 \quad (46)$$

onde $V_{digital}$ é a saída digital do conversor (valor inteiro) e $V_{analógico}$ é o sinal analógico de entrada do conversor [V].

O sinal digitalizado é tratado através do software desenvolvido no microcontrolador usando IDE Arduino. Primeiramente são armazenadas 30 medidas do valor obtido na conversão A/D com frequência de amostragem de 9600Hz e em seguida é obtida uma média aritmética a fim de mitigar possíveis oscilações da tensão elétrica medida. Em seguida, o número de 0 a 1023 obtido é convertido no valor equivalente em tensão elétrica [V]. Este valor é então aplicado na função de transferência experimental e convertido em um valor de vazão [m^3/h]. O valor de vazão obtido é enviado ao display LCD, onde o usuário pode visualizar a medida realizada. O código desenvolvido é apresentado no Anexo D. A alimentação da placa é feita usando uma fonte de 9Vdc. A placa conta com uma referência de 5V que alimenta também o sensor de pressão diferencial.

3.5 Procedimento de Determinação da Função de Transferência Experimental

Para a determinação da função de transferência experimental, foi adotado o seguinte procedimento. Montado o sistema de medição, foi adicionado um medidor de vazão comercial do tipo turbina fabricado pela empresa Contech modelo SVTG25/25 com erro de linearidade de $\pm 1\%$, segundo manual do fabricante. O medidor comercial foi inserido na linha de fluxo de ar, em série com o sistema desenvolvido, a jusante. Um ventilador foi conectado à entrada de ar do sistema produzindo vazão, que foi variada utilizando-se uma válvula mecânica na saída de ar da tubulação. A Figura 24 apresenta uma foto da instalação. Com o sistema em funcionamento, foram monitorados simultaneamente os valores de vazão usando o medidor comercial, e a respectiva tensão de saída do sensor, usando um multímetro da marca Tektronix modelo DMM4050 na escala de 10V com precisão de $\pm(0,0035\% + 0,00005 V)$.

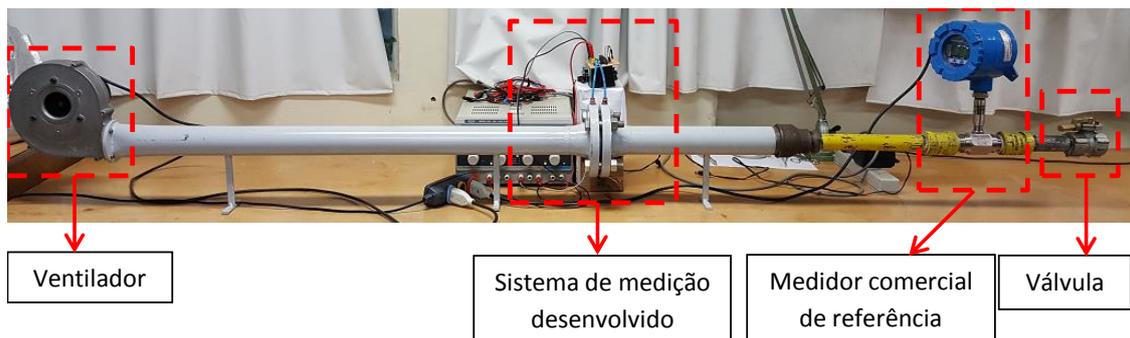


Figura 24: Instalação para o procedimento de calibração do sistema.

Estes valores foram registrados para toda a faixa de vazão ($5 - 50 \text{ m}^3/\text{h}$) com resolução de $1 \text{ m}^3/\text{h}$. Foram feitas cinco séries de medidas de tensão elétrica aleatoriamente ao longo da faixa de vazão e calculada a média aritmética entre as séries.

Com os valores obtidos, foi gerado um gráfico com os valores de vazão [m^3/h] em função da tensão elétrica média de saída [V]. Em seguida, através de regressão por mínimos quadrados foi determinada a função que melhor aproxima os pontos medidos, portanto a função de transferência experimental do sistema, ou seja, a relação entre tensão elétrica de saída e a vazão. Para gerar o gráfico e obter a função de transferência experimental foi usado o *software* MATLAB 7.11.0.

Com a função obtida, foram calculados o erro de conformidade a partir da Equação (47):

$$\text{Erro Conformidade}\% = \frac{|V_{medido} - V_{calculado}|_{max}}{FE} \cdot 100 \quad (47)$$

onde $|V_{medido} - V_{calculado}|_{max}$ é a máxima diferença entre o valor real e a curva de calibração $[V]$ em módulo, e FE é o fundo de escala da tensão de saída $[V]$. A sensibilidade do sistema foi obtida pela Equação (48):

$$S = \frac{d}{dQ}[V(Q)] \quad (48)$$

onde S é a sensibilidade do sistema, Q é a vazão de entrada $[m^3/h]$ e $V(Q)$ é a função de transferência de tensão elétrica de saída $[V]$.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Cálculo da Placa de Orifício

De acordo com o método definido na Seção 3.1.1 o diâmetro do orifício foi definido a partir da pressão diferencial teórica. Isolando o termo Δp da Equação (31) têm-se a Equação (49):

$$\Delta p = \frac{16Q^2 \cdot (1 - \beta^4) \cdot \rho}{2C^2 \cdot \epsilon^2 \cdot \pi^2 \cdot d^4} \quad (49)$$

onde Δp é a pressão diferencial do fluido [Pa], Q é a vazão volumétrica [m^3/s], β é a razão entre diâmetros (adimensional), ρ é a massa específica do fluido [kg/m^3], C é o coeficiente de descarga (adimensional), ϵ é o fator de expansão (adimensional) e d é o diâmetro do orifício [m].

Primeiramente foi escolhido $\beta = 0,5$. Substituindo os valores na Equação (49), têm-se as equações (50) e (51) para a vazão mínima e para a vazão máxima respectivamente:

$$\Delta p_{min} = \frac{16 \cdot 0,004167^2 \cdot (1 - 0,5^4) \cdot 1,225}{2 \cdot 0,6163^2 \cdot 0,9871^2 \cdot \pi^2 \cdot 0,0263^4} = 1482,17 Pa \quad (50)$$

$$\Delta p_{max} = \frac{16 \cdot 0,016667^2 \cdot (1 - 0,5^4) \cdot 1,225}{2 \cdot 0,6163^2 \cdot 0,9871^2 \cdot \pi^2 \cdot 0,0263^4} = 92,64 Pa \quad (51)$$

Em seguida, foi escolhido o sensor de pressão diferencial com faixa de pressão de até $1,25kPa$. Portanto, o diâmetro do orifício foi recalculado para adequar a pressão diferencial produzida à faixa de entrada do sensor. O resultado final foi obtido usando um orifício de $28mm$ e, portanto β de $0,5323$. Dessa forma, o cálculo final da pressão diferencial teórica produzida pela placa de orifício é apresentado nas Equações (52) e (53):

$$\Delta p_{min} = \frac{16 \cdot 0,004167^2 \cdot (1 - 0,5323^4) \cdot 1,225}{2 \cdot 0,6163^2 \cdot 0,9871^2 \cdot \pi^2 \cdot 0,028^4} = 785,98 Pa \quad (52)$$

$$\Delta p_{max} = \frac{16 \cdot 0,016667^2 \cdot (1 - 0,5323^4) \cdot 1,225}{2 \cdot 0,6163^2 \cdot 0,9871^2 \cdot \pi^2 \cdot 0,028^4} = 70,74 Pa \quad (53)$$

4.2 Determinação da Função de Transferência Experimental

A Tabela 4 apresenta, os dados obtidos no procedimento de determinação da função de transferência descrito na Seção 3.4. A resolução de entrada e de saída do sistema são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 4: Medidas realizadas para a determinação da função de transferência experimental.

Vazão (m ³ /h)	Tensão Elétrica Média (V)	Incerteza (mV)	Vazão (m ³ /h)	Tensão Elétrica Média (V)	Incerteza (mV)
50	4,89	±0,221	32	1,95	±0,118
49	4,70	±0,215	31	1,82	±0,114
48	4,51	±0,208	30	1,70	±0,110
47	4,32	±0,201	29	1,58	±0,105
46	4,15	±0,195	28	1,47	±0,101
45	3,97	±0,189	27	1,36	±0,098
44	3,80	±0,183	26	1,25	±0,094
43	3,63	±0,177	25	1,14	±0,090
42	3,44	±0,170	24	1,04	±0,086
41	3,28	±0,165	23	0,96	±0,084
40	3,12	±0,159	22	0,85	±0,080
39	2,96	±0,154	21	0,77	±0,077
38	2,80	±0,148	20	0,69	±0,074
37	2,65	±0,143	19	0,61	±0,071
36	2,51	±0,138	18	0,54	±0,069
35	2,36	±0,133	17	0,46	±0,066
34	2,21	±0,127	16	0,40	±0,064
33	2,09	±0,123	15	0,34	±0,062

Tabela 5: Resolução de entrada e de saída do sistema.

Resolução de Entrada	0,125 m ³ /h
Resolução de Saída	0,0075 V

A Figura 25 apresenta as medidas realizadas no procedimento de determinação da função de transferência de tensão de saída do sistema descrito na seção 3.4, além da curva da função de transferência obtida a partir das medições. A partir dos dados obtidos foram calculados a função de transferência experimental do sistema, o erro de conformidade e a sensibilidade, apresentados na Tabela 6.

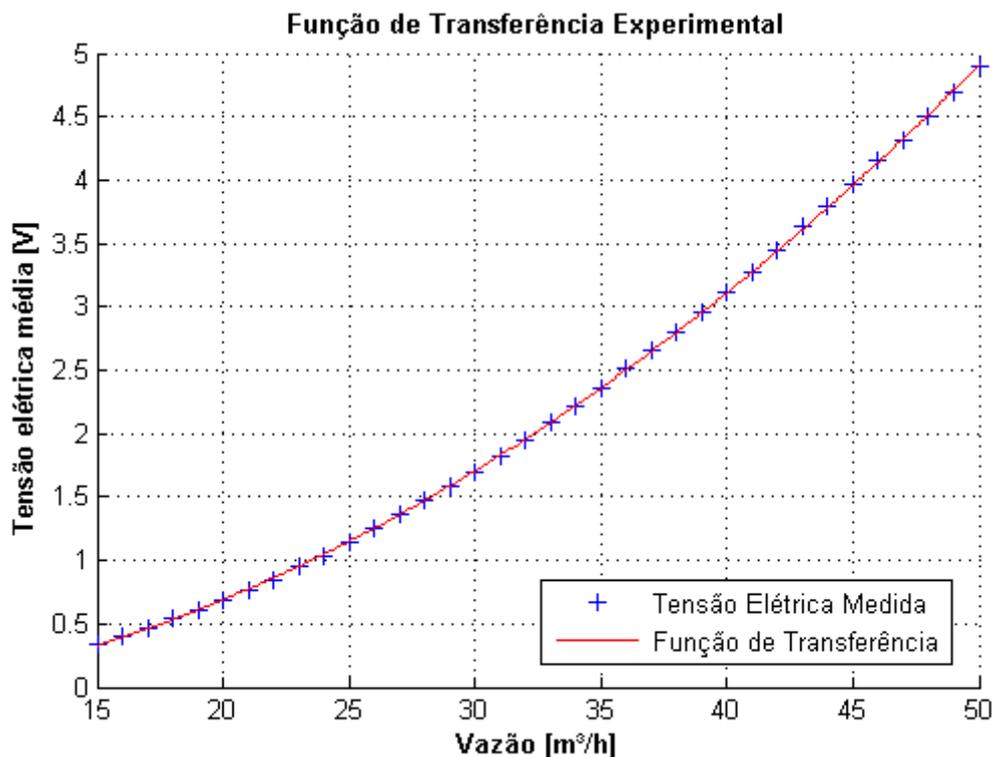


Figura 25: Função de transferência experimental de tensão de saída do sistema.

Tabela 6: Características do sistema de medição de vazão.

Função de Transferência	$V = 0,0019533 \cdot Q^2 + 0,0038815 \cdot Q - 0,16902$
Erro de Conformidade	0,41%
Sensibilidade	$S = 0,00391066 \cdot Q + 0,0038815$

onde V é a tensão de saída do sistema [V], Q é a vazão de entrada [m^3/h] e S é a sensibilidade do sistema $\left[\frac{V}{(m^3/h)^2} \right]$.

Nota-se que a função de transferência do sistema trata-se de um polinômio de segunda ordem, portanto é não linear. Esse formato de curva é esperado já que, de acordo com a equação geral da vazão volumétrica (Equação (31)), a vazão é proporcional à raiz quadrada da pressão diferencial, e a tensão elétrica de saída do sensor de pressão é linear em relação à pressão de entrada, de acordo com a função de transferência do sensor de pressão (Equação (32)). Portanto, a relação entre a tensão elétrica de saída e a vazão é não linear.

A Figura 26 compara a função de transferência teórica, obtida a partir dos cálculos apresentados na Seção 3.3, e a função de transferência experimental obtida a partir das medições realizadas.

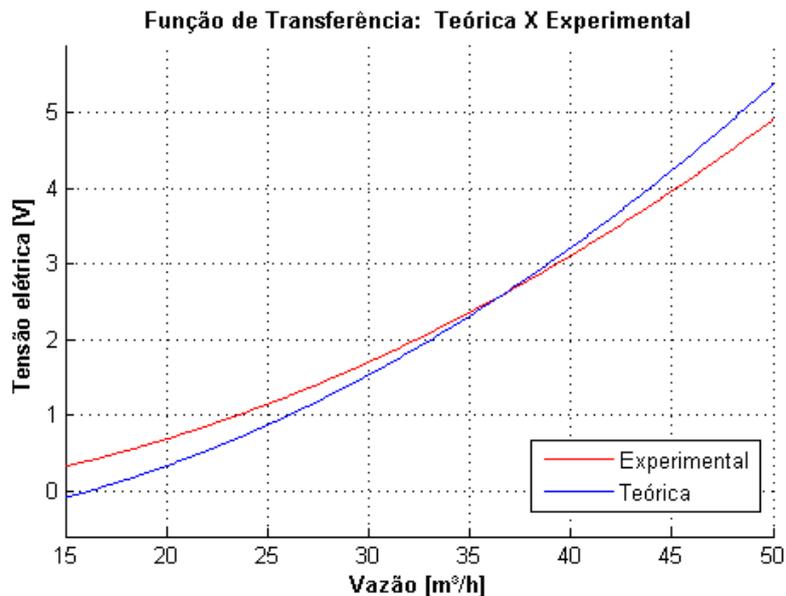


Figura 26: Comparação entre função de transferência teórica e função de transferência experimental.

Os valores de tensão elétrica obtidos através de cada uma das funções de transferência ao longo da faixa de vazão são apresentados na Tabela 7 com a diferença relativa ao fundo de escala.

Tabela 7: Comparação entre função de transferência teórica e função de transferência experimental.

Função de Transferência Teórica				Função de Transferência Experimental			
Vazão (m ³ /h)	Tensão Elétrica (V)	Tensão Elétrica (V)	Diferença (%)	Vazão (m ³ /h)	Tensão Elétrica (V)	Tensão Elétrica (V)	Diferença (%)
50	5,38	4,91	9,30	32	1,83	1,96	2,55
49	5,14	4,71	8,55	31	1,68	1,83	2,97
48	4,90	4,52	7,69	30	1,54	1,71	3,50
47	4,68	4,33	6,93	29	1,39	1,59	3,93
46	4,45	4,14	6,27	28	1,26	1,47	4,27
45	4,24	3,96	5,50	27	1,12	1,36	4,71
44	4,02	3,78	4,83	26	1,00	1,25	5,05
43	3,81	3,61	4,05	25	0,88	1,15	5,50
42	3,61	3,44	3,37	24	0,76	1,05	5,85
41	3,41	3,27	2,79	23	0,64	0,95	6,11
40	3,22	3,11	2,10	22	0,54	0,86	6,47
39	3,03	2,95	1,51	21	0,43	0,77	6,73
38	2,84	2,80	0,81	20	0,34	0,69	7,10
37	2,66	2,65	0,21	19	0,24	0,61	7,37
36	2,49	2,50	0,29	18	0,15	0,53	7,55
35	2,32	2,36	0,90	17	0,07	0,46	7,83
34	2,15	2,22	1,41	16	-0,01	0,39	8,01
33	1,99	2,09	2,03	15	-0,09	0,33	8,30

Pode se observar uma considerável diferença entre a função de transferência teórica e a função experimental. Essa diferença pode se ocasionada por imprecisões nos cálculos teóricos e, mais provavelmente, imperfeições na construção física do sistema tornando-o mais distante do ideal. também foram feitos ajustes ao circuito condicionador ao longo do desenvolvimento do sistema experimental, após a determinação da função de transferência teórica. Entretanto, o resultado obtido experimentalmente aproximou-se das previsões teóricas, sendo as diferenças encontradas mitigadas pelo processo de calibração do sistema, não comprometendo o desempenho adequado do sistema.

4.3 Cadeia de Medidas Experimental

A cadeia de medidas experimental do sistema é apresentada na Figura 27. Não foram obtidas medidas experimentais de pressão de entrada do sensor, sendo essa parte do sistema tratada como um bloco com entrada de vazão e saída em tensão.

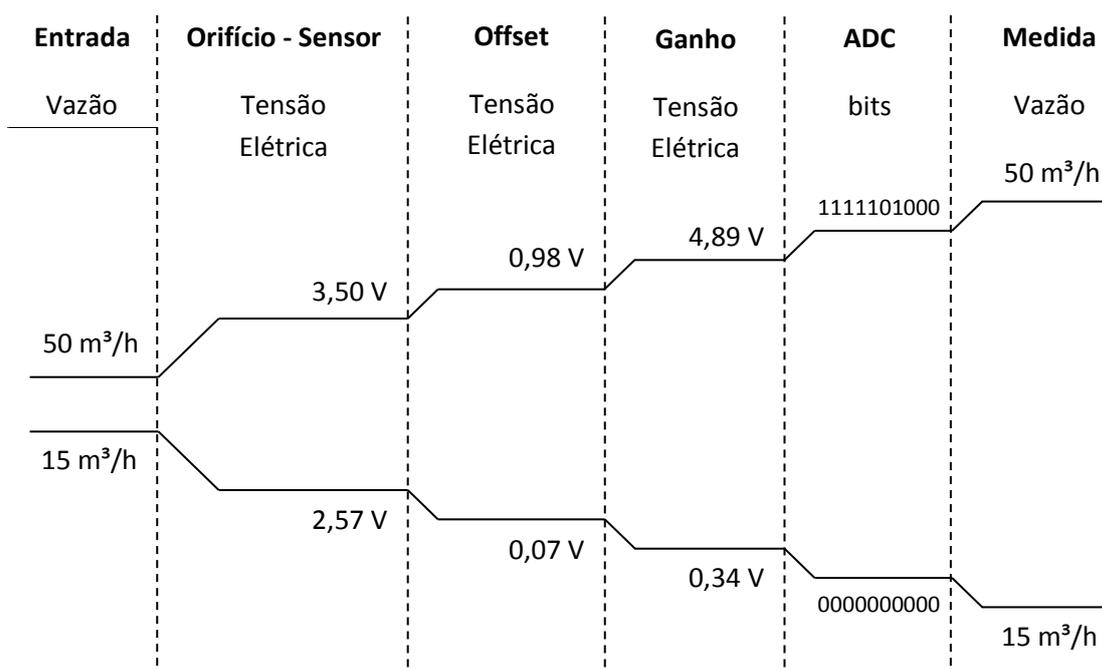


Figura 27: Cadeia de Medidas experimental do sistema.

Primeiramente nota-se uma diferença entre a cadeia de medidas teórica e a cadeia experimental na saída do sensor de pressão diferencial. Essa diferença de 0,16 V na vazão máxima pode ter dois motivos. O primeiro é uma diferença entre a pressão diferencial teórica calculada através da Equação (31) e a pressão diferencial experimental. Esse tipo de erro pode ser ocasionado pelas imperfeições construtivas do sistema ou por imprecisões nos cálculos.

A incerteza do diâmetro real do orifício e do tubo também pode ser uma causa de erro, já que o termo β , relação entre o diâmetro do orifício e do tubo, é elevado à quarta potência na Equação (31), sendo o resultado final bastante sensível a imprecisões nesse termo. O segundo motivo para essa diferença na saída do sensor, seria uma diferença na função de transferência teórica e experimental do sensor de pressão. A segunda hipótese é menos provável devido à alta confiabilidade relacionada a este sensor.

A cadeia de medidas experimental apresenta diferenças em relação à cadeia de medidas teóricas também nos estágios de *offset* e ganho. Nesse caso, as diferenças acontecem devido à incerteza nos valores de resistência dos resistores com tolerância de 1% usados no circuito. Além disso, o ganho sofreu uma leve redução proposital para que a tensão elétrica não ultrapasse o limite máximo do conversor A/D de 5V. Todavia, os erros indicados se encontram dentro dos limites aceitáveis e não comprometem o desempenho do sistema de medição.

4.4 Ensaio Final de Medidas

Com a função de transferência experimental do sistema definida e aplicada no sistema de aquisição de dados, foi feito um ensaio de medições analisando a medida final de vazão [m^3/h] do sistema completo. Uma foto do sistema completo de medição é apresentada na Figura 28. O resultado comparado às medidas de referência, obtidas através do medidor de vazão comercial, é apresentado na Tabela 8 com a diferença entre a medida e o valor de referência expressa em porcentagem do fundo de escala. A diferença máxima observada é de 0,46%

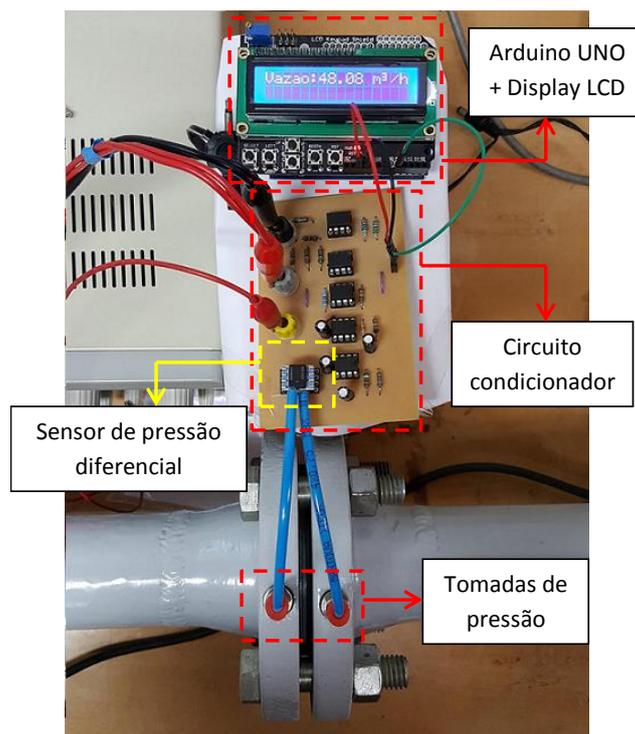


Figura 28: Foto sistema de medição completo.

Tabela 8: Medidas finais comparativas de vazão.

Vazão Referência (m ³ /h)	Tensão Digital (bits)	Vazão Medida (m ³ /h)	Diferença (% F.E.)	Vazão Referência (m ³ /h)	Tensão Digital (bits)	Vazão Medida (m ³ /h)	Diferença (% F.E.)
50,00	1000	49,90	0,20	32,00	398	31,93	0,14
49,00	971	49,18	0,36	31,00	372	30,92	0,16
48,00	922	47,94	0,12	30,00	350	30,05	0,10
47,00	889	47,10	0,20	29,00	323	28,95	0,10
46,00	856	46,22	0,44	28,00	301	28,02	0,04
45,00	813	45,07	0,14	27,00	275	26,84	0,32
44,00	775	44,03	0,06	26,00	255	25,96	0,08
43,00	744	43,15	0,30	25,00	232	24,84	0,32
42,00	705	42,03	0,06	24,00	217	24,11	0,22
41,00	672	41,08	0,16	23,00	193	22,90	0,20
40,00	642	40,16	0,32	22,00	175	21,93	0,14
39,00	607	39,08	0,16	21,00	157	20,90	0,20
38,00	575	38,06	0,12	20,00	139	19,89	0,22
37,00	543	37,04	0,08	19,00	123	18,86	0,28
36,00	510	35,92	0,16	18,00	111	18,15	0,30
35,00	485	35,08	0,16	17,00	95	17,01	0,02
34,00	456	34,05	0,10	16,00	84	16,23	0,46
33,00	423	32,85	0,30	15,00	69	15,11	0,22

5 CONCLUSÕES

A partir deste trabalho foi possível desenvolver um sistema de medição de vazão de ar em uma tubulação a partir do desenvolvimento de uma placa de orifício e pela medição da queda de pressão ocasionada por este obstáculo.

O desenvolvimento do sistema começou com uma revisão bibliográfica apresentada no Capítulo 2, onde foram abordados os conceitos básicos sobre medição de vazão de fluidos, partindo de leis básicas da mecânica dos fluidos até os principais métodos de medição empregados. A partir daí, foi definida a metodologia experimental aplicada no projeto apresentada no Capítulo 3, onde foi escolhido o método da placa de orifício com tomadas de pressão em flanges devido à sua simplicidade de construção, baixo custo e baixa manutenção. Neste capítulo, foram detalhados os blocos do sistema começando pelo desenvolvimento da placa de orifício, calculando-se suas dimensões para que produza uma pressão diferencial dentro da faixa desejada para uma faixa de entrada de 15 a 50 m^3/h . Em seguida foram definidas as dimensões dos flanges acomodando a placa de orifício de forma adequada e as tomadas de pressão.

Foi escolhido o sensor de pressão diferencial responsável por converter a queda de pressão produzida na placa de orifício em um sinal de tensão elétrica. Para isso foi definido um sensor piezoresistivo fabricado pela empresa Honeywell modelo HSCDRRN005-NDAA5 com faixa de entrada de $\pm 1,25kPa$. A fim de tratar o sinal de tensão elétrica de saída do sensor para se obter um valor de vazão foi desenvolvido um circuito condicionador e um sistema de aquisição de dados utilizando uma placa microcontrolada comercial Arduino Uno. O circuito condicionador ajustou a faixa de tensão elétrica de saída do sensor, de 2,57V a 3,50V, à faixa de tensão elétrica de entrada do conversor A/D, de 0V a 5V presente no Arduino Uno, através de um estágio de *offset* e um estágio de ganho. Além disso, um filtro anti-aliasing passa-baixas atenuou as frequências acima de 36Hz.

Com essa parte do sistema montada, foi determinada a função de transferência experimental do sistema. Para isso, o sistema desenvolvido foi instalado em série com

um medidor de vazão comercial, fabricado pela empresa Contech modelo SVGT25/25, usado como referência. Dessa forma, variando-se a vazão ao longo da faixa de entrada do sistema, foi medida a tensão de saída condicionada do sistema para cada valor de vazão, utilizando um multímetro com precisão de 6 dígitos da marca Tektronix, modelo DMM4050m. A partir destas medições a função de transferência experimental foi determinada através de regressão pelo método de mínimos quadrados usando o *software* MATLAB 7.11.0. A função obtida apresentou um erro de conformidade de 0,41%.

Para se obter a medida final de vazão em m^3/h , o sistema de aquisição de dados recebe o sinal analógico condicionado e, através do conversor A/D de 10 bits com frequência de amostragem de 9600 Hz, transforma em um sinal digital, de forma que possa ser tratado através do *software* desenvolvido na plataforma Arduino. Aplicando o valor de tensão digitalizado na função de transferência experimental obtida para o sistema, o *software* gerou um valor de vazão como medida final. A medida é então enviada para um *display* LCD onde pode ser visualizada pelo usuário.

Para validar o sistema de medição, este foi montado novamente na mesma tubulação de ar do medidor comercial de referência. Desta vez foram comparadas a medida final do sistema e a medida de referência, ambas em m^3/h . Neste ensaio, o maior erro encontrado em uma medida foi de 0,46% do fundo de escala.

Desta forma, o sistema de medição de vazão de ar baseado em orifício desenvolvido neste trabalho foi validado, constatando-se o erro na medida final de 0,46% dentro da faixa de medição proposta.

6 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

As principais propostas para melhorias no sistema desenvolvido neste trabalho são:

- Adicionar ao sistema uma medida de volume total de ar que passou pela tubulação ao longo de determinado período, incrementando uma função do equipamento, útil em medidas de consumo.

- Fazer uma simulação computacional do fenômeno físico de vazão dentro da tubulação em busca do aperfeiçoamento do desenho do conjunto de placa de orifício mais flanges.

- Adicionar condicionadores de fluxo à tubulação para diminuir a turbulência do ar.

- Testar o sistema na medição de outros fluidos, gases e líquidos.

- Analisar os efeitos da variação de temperatura e pressão do fluido na desempenho do sistema. Desenvolvendo um sistema de compensação desses fatores se necessário, como, por exemplo, com o uso de sensores de temperatura.

- Determinar a incerteza combinada do sistema proposto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABB. **Industrial Flow Measurement. Basics and Practice**. 1. ed. [S.l.]: ABB Automation Products, 2011.
- BAKER, R. C. **Flow Measurement Handbook**. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- BAKER, W.; POZARSKI, R. Overcoming Flow Measurement Challenges. **Control Engineering**, [S.l.], p.29–32, jan 2016.
- BENEDICT, R. P. **Fundamentals of Temperature, Pressure, and Flow Measurements**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1984.
- DELMÉE, G. J. **Manual de Medição de Vazão**. 1. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1983.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- ISO 5167-2:2003(E). **Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular-cross section conduits running full -**. Geneva, CH: International Organization for Standardization, 2003. Standard.
- LANASA, P. J.; UPP, E. L. **A Practical Guide to Accurate Flow Measurement**. 3. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014.
- MILLER, R. W. **Flow Measurement Engineering Handbook**. 3. ed. New York: McGraw-Hill Education, 1996.
- WEBSTER, J. G. **The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 1999.

ANEXO A DESENHO DA PLACA DE ORÍFICIO

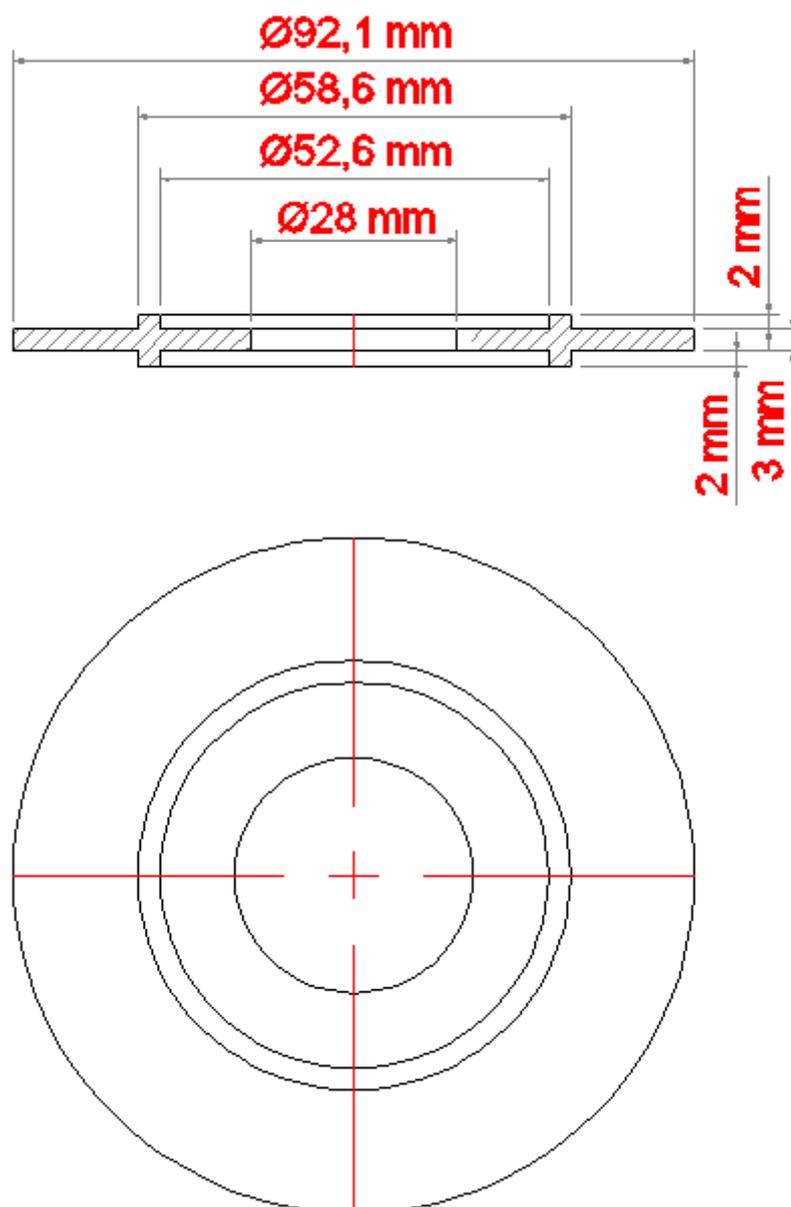


Figura 29: Desenho da placa de orifício desenvolvida.

ANEXO B DESENHO DOS FLANGES USADOS

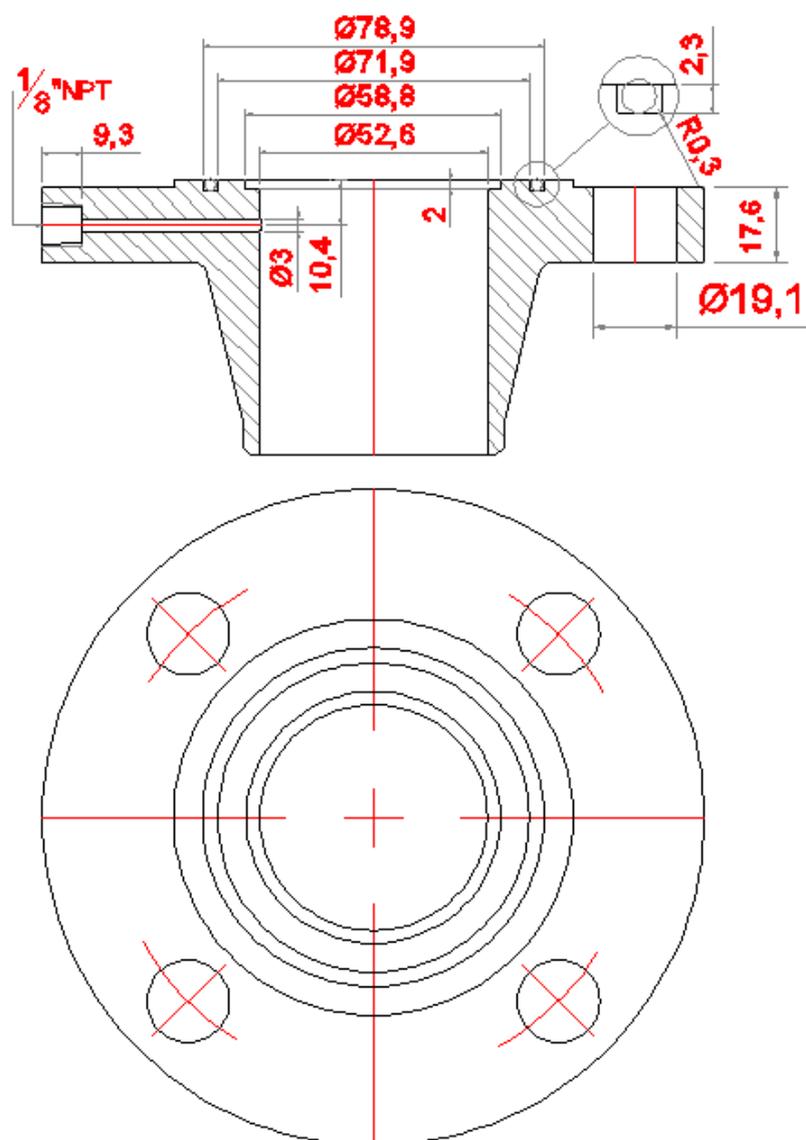


Figura 30: Desenho dos flanges usados no trabalho. Medidas em [mm].

ANEXO C DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO DESENVOLVIDO

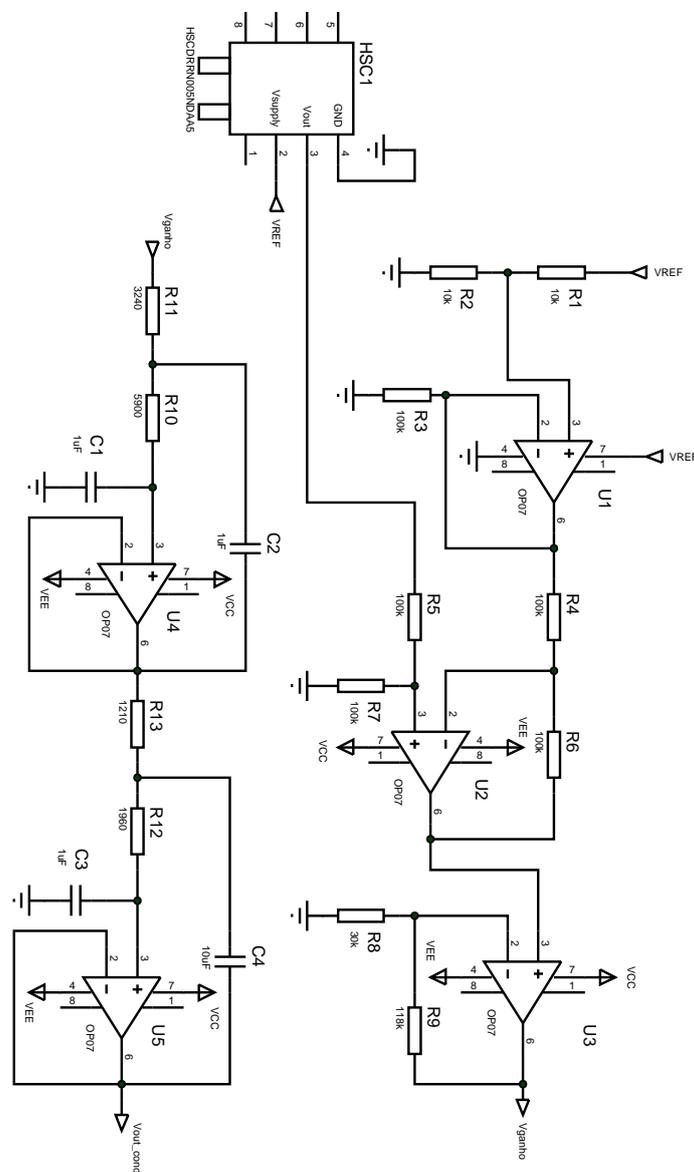


Figura 31: Diagrama Esquemático do Circuito Desenvolvido.

ANEXO D CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO MEDI- DOR DE VAZÃO DE REFERÊNCIA

Contech. Contech Indústria e Comércio de Equipamentos Eletrônicos Ltda.
Laboratório de Vazão de Gás

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

n° 10080130 0910 C7

Cliente: **SPRINGER CARRIER LTDA**
Endereço: **R. Berto Cirio, 521 - São Luis - Canoas/RS**
O.S. **2010/1983**

IDENTIFICAÇÃO DO MEDIDOR E INDICADOR

Tipo:.....	TURBINA	Número de Série:.....	10080130
Modelo:...	SVTG 1"	Fabricante:.....	CONTECH
Fator K:...	157728,38	Diâmetro Nominal:.....	1"
Qmáx:.....	85,00 m³/h	Qmín:.....	8,50 m³/h
Indicador:..	CTH2265	Número de Série:.....	10080131

MEDIDORES PADRÕES UTILIZADOS

Medidor Rotativo Elster G65, N.S. 62930101, Calibrado em 26/05/2010 - Certificado IPT 102.637-101

Cujas calibrações estão rastreadas a padrões do Laboratório de Vazão de Gás do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, pertencente à RBC - Rede Brasileira de Calibração

PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO

Procedimento PC2004/01 R00 - Calibração de Medidores de Gás na Bancada de Alta Vazão.
Comparação entre a contagem de volume realizada pelo medidor em teste e a contagem de volume realizada pelo medidor padrão, com suas devidas correções, utilizando ar como fluido de escoamento.

CONFIGURAÇÃO DO INDICADOR

Ponto	LIN (F)	ENG(m³/h)
0	0	0
1	396	9,4
2	861	19,7
3	1424	32,5
4	1979	45,2
5	2495	56,9
6	3132	71,4
7	3672	84,0

CONDIÇÕES AMBIENTAIS

Temperatura:	19,3 °C	a	19,5 °C
Umidade Relativa:	56%	a	55%

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

n° 10080130 0910 C7

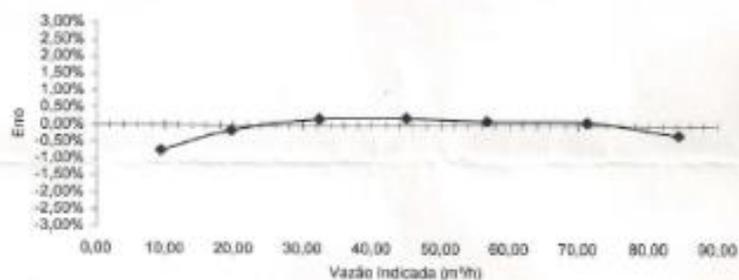
RESULTADOS

Q m³/h	Q Indicada m³/h	Erro %	Desvio Padrão Experimental	Incerteza Expandida
9,38	9,45	-0,74%	0,033%	0,48%
19,68	19,71	-0,15%	0,007%	0,48%
32,51	32,45	0,18%	0,009%	0,48%
45,16	45,07	0,21%	0,004%	0,48%
56,89	56,82	0,13%	0,003%	0,48%
71,44	71,37	0,10%	0,006%	0,48%
84,10	84,33	-0,28%	0,008%	0,48%

Incerteza:

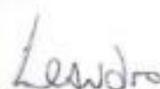
As incertezas expandidas relatadas são baseadas em suas incertezas padrão combinadas, multiplicadas pelo fator de abrangência $k = 2$, que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

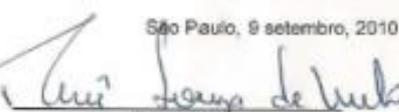
$$\text{Erro} = \frac{Q - Q \text{ Indicada}}{Q} \times 100\%$$

**CONDIÇÕES DO FLUÍDO**

Maior Temperatura:... 18,5 °C Maior Pressão Absoluta: 92,6 kPa
 Menor Temperatura:... 18,0 °C Menor Pressão Absoluta: 88,9 kPa

Data da Calibração: 09/09/2010


 Técnico
 Leandro Santos

São Paulo, 9 setembro, 2010

 Supervisor
 Rene Souza de Melo

ANEXO E ROTINA DE AQUISIÇÃO DESENVOLVIDA NO ARDUINO UNO

```

#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd(8, 9, 4, 5, 6, 7); %% define os pinos do display lcd
byte tres[8]={ B11100, B00100, B11100, B00100, B11100, B00000, B00000, B00000 };
%% define o char referente ao símbolo "³" para ser mostrado no display

void setup() {
lcd.begin(16, 2); %% inicializa o display lcd
lcd.createChar(0,tres); %% cria o char referente ao símbolo "³"
lcd.setCursor(0,0);
lcd.write("Vazao:");
lcd.setCursor(12,0);
lcd.write("m"); lcd.write(byte(0)); lcd.write("/h"); %% escreve no display "Vazao:" e "m³/h"
}

void loop() {
int sensor; %% variável correspondente à tensão de saída do conversor A/D
int i; %% contador do laço for
int a[30];
for (i=0;i<30;i++) %% laço for toma 30 medidas da tensão de saída do conversor A/D
{
sensor = analogRead(A1); %% armazena uma leitura na variável "sensor"
a[i] = sensor; %% guarda no vetor de 30 medidas no total
delay(100); %% adiciona um atraso entre as medidas
}
}

```

```
int soma=0;
for(i=0;i<30;i++) %% laço for soma as 30 medidas tomadas para fazer a média
{
soma = soma + a[i];
}
int vdig = soma/30; %% divide a soma por 30 armazenando a média na variável "vdig"
float V=vdig*4.975/1023.0; %% calcula o valor equivalente em tensão (V)
float Q=255.977064455026*sqrt(0.0078132*V+0.00133565310625)-0.993574975682179;
%% aplica o valor de tensão na função de transferência experimental e calcula a vazão
lcd.setCursor(6,0);
lcd.print(Q); %% imprime no display o valor de vazão medido
}
```