



**Universidade Federal do Oeste do Pará
Instituto de Ciências e Tecnologia das Águas
Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental**

**CONSTRUÇÃO DE UM MEDIDOR DE VAZÃO TIPO VENTURI: CALIBRAÇÃO E
OPERAÇÃO**

ADARLOS SERVILHA TORRES

**Santarém-PA
2018**

ADARLOS SERVILHA TORRES

**CONSTRUÇÃO DE UM MEDIDOR DE VAZÃO TIPO VENTURI: CALIBRAÇÃO E
OPERAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Sanitária e
Ambiental da Universidade Federal do Oeste do
Pará para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Sanitária e Ambiental.

Área de concentração: Engenharia Sanitária e
Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Lucinewton Silva de Moura.

**Santarém-PA
2018**

FOLHA DE AVALIAÇÃO

Nome do Autor: Adarlos Servilha Torres

Título: Construção de um medidor de vazão tipo Venturi: calibração e operação

Monografia apresentada ao Curso Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal do Oeste do Pará para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Data da aprovação: Santarém, 17 de Abril de 2018

Banca Examinadora

Msc. Manoel Bentes dos Santos Filho

Curso: ICTA/UFOPA

Msc. Jessyca Ingles Nepomuceno dos santos

Curso: Eng. Sanitária e Ambiental/UFOPA

Dr. Lucinewton Silva de Moura - Presidente

Curso: Eng. Sanitária e Ambiental/UFOPA

DEDICATÓRIA

Dedico esta, bem como todas as minhas demais conquistas no meio acadêmico, a minha esposa Daiane Almeida Torres e ao meu filho,(o meu maior presente) Augusto Almeida Torres, os quais sempre de forma impar me impulsionaram grandemente para chegar ate aqui, embora meu filho não tendo conhecimento disto, iluminou de maneira especial os meus pensamentos me levando a buscar mais conhecimentos, aos meus pais Antonio Carlos Torres e Adalgisa Barros Servilha Torres, que com muito carinho e apoio, nunca mediram esforços para que eu chegasse a conquistar mais esse degrau, aos meus irmãos Carlos Servilha Torres e Otniel Servilha Torres que estiveram sempre presentes me ajudando incansavelmente.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer, em primeiro lugar, a Deus, pela força e coragem durante toda esta longa caminhada. Seu fôlego de vida em mim me foi sustento e me deu coragem para questionar realidades e propor sempre um novo mundo de possibilidades. Agradeço também a todos os colegas BESA 2013 e todos os professores que me acompanharam durante a graduação, aos professores que irão compor a banca pois tenho certeza que serão imparcial, e em especial ao Prof. Dr. Lucinewton Silva de Moura, companheiro de Caminhada ao longo do Curso responsável pela realização deste trabalho.

“Se A é o sucesso, então A é igual a X mais Y mais Z. O trabalho é X; Y é o lazer; e Z é manter a boca fechada”.

(Albert Einstein)

RESUMO

TORRES, A.S. Construção de um medidor de vazão tipo Venturi: Calibração e operação. 2018. 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Eng. Sanitária e ambiental) – Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal do Oeste do Pará.

Utilizando-se de dispositivos relativamente fáceis de serem adquiridos, além de materiais de baixo custo, o presente trabalho tem como enfoque relatar as etapas de construção, avaliação e operação de um medidor de vazão do tipo “Venturi”. Fazendo uso de métodos de pesquisa fundamentados no levantamento e na análise bibliográfica, buscar-se-á o conhecimento necessário acerca da utilização de técnicas de calibração e avaliação encontradas facilmente na literatura concernente ao assunto, sendo perfeitamente possível construir, artesanalmente, um dispositivo semelhante ao idealizado pelo seu criador, Giovanni Battista Venturi. Desse modo, o dispositivo construído nessa monografia refere-se ao modelo clássico do Tubo Venturi, que se baseia nos cálculos e métodos que derivam da equação de Bernoulli. Finalizada a construção, o dispositivo foi iniciado para que o regime de equilíbrio fosse alcançado. A partir de então, o processo de regulação de vazão foi iniciado, utilizando-se da leitura do manômetro de acordo com diferentes quantidades de fluidos existentes no dispositivo. Embora de construção artesanal, o dispositivo apresentou boa resposta aos métodos de calibração apresentados na literatura, bem como demonstrou bastante precisão em seus resultados, cumprindo perfeitamente seu objetivo. Além da confecção, calibração e utilização do dispositivo, a facilidade de uso comprova os motivos pelos quais a ferramenta é a mais utilizada de acordo com a sua finalidade precípua de medir vazão de fluidos.

Palavras-chave: Tubo de Venturi. Vazão. Medição. Fluidos. Construção.

ABSTRACT

TORRES, A.S. Construction of a venturi type flowmeter: Calibration and operation. 2018. 43 f. Course Completion Work (Waste Management) - Coordination of the Bachelor's Degree in Sanitary and Environmental Engineering. Federal University of West of Pará.

Using relatively easy-to-acquire devices, in addition to low cost materials, the present work focuses on the construction, evaluation and operation stages of a venturi flowmeter. Using research methods based on survey and bibliographical analysis, we will seek the necessary knowledge about the use of calibration and evaluation techniques found easily in the literature concerning the subject, and it is perfectly possible to construct a device similar to idealized by its creator, Giovanni Battista Venturi. Thus, the device constructed in this monograph refers to the classic Venturi Tube model, which is based on the calculations and methods that derive from the Bernoulli equation. After the construction, the device was started so that the equilibrium regime was reached. Thereafter, the process of flow regulation was initiated, using the manometer reading according to different amounts of fluids in the device. Although of handcrafted construction, the device presented good response to the calibration methods presented in the literature, as well as demonstrated quite accurately in its results, perfectly fulfilling its objective. Besides the confection, calibration and use of the device, the ease of use proves the reasons why the tool is the most used according to its primary purpose of measuring fluid flow.

Keywords: Venturi tube. Flow rate. Measurement. Fluids. Construction

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Medidores de vazão do tipo turbina.....	17
Figura 2:	Medidores eletromagnéticos.....	18
Figura 3:	Medidores de vazão (diferencial de pressão).....	18
Figura 4:	Perda de carga entre o diâmetro da garganta (d) e tubulação principal (D).....	19
Figura 5:	Comparativo das aplicações padrão entre os medidores de pressão.....	23
Figura 6:	Modelo recomendado para um medidor Venturi.....	25
Figura 7:	Momento de validação: Equipamento em funcionamento.....	27
Figura 8:	Reservatório (40x40x50cm).....	35
Figura 9:	Tubo de Venturi.....	37
Figura 10:	Rotâmetro.....	37
Figura 11:	Conjunto motor/bomba 0,5cv (SOMAR).....	38
Figura 12:	Manômetro diferencial.....	38
Figura 13:	Parte interna do dispositivo.....	39
Figura 14:	Parte interna do equipamento.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Lista de materiais utilizados no projeto.....	29
Tabela 2: Custo financeiro para elaboração do projeto.....	36
Tabela 3: Perda de carga.....	40
Tabela 4: Eficiência do dispositivo.....	41

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GERAL	14
2.2	OBJETIVOS ESPÉCIFICOS	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	VAZÃO VOLUMÉTRICA	15
3.2	TIPOS DE MEDIDORES DE VAZÃO	155
3.2.2	Tipo turbina	16
3.2.3	Eletromagnéticos.....	17
3.2.4	Por diferencial de pressão	18
3.2.4.1	Tubo de Pitot	20
3.2.4.2	Placa de Orifício	21
3.2.4.3	Medidor Venturi	23
3.3	TEOREMA DE BERNOULLI	25
3.3.1	Considerações gerais	26
3.3.2	Equação de Bernoulli	27
4	MATERIAL E MÉTODO	29
4.1	MATERIAIS UTILIZADOS.....	29
4.2	MÉTODO DE CALIBRAÇÃO	29
4.2.1	Arranjo matemático para se chegar a uma equação favorável ao equipamento desenvolvido é dado por	30
4.2.2	Área da tubulação do sistema.....	33
4.3	MÉTODO DE CALIBRAÇÃO DO TUBO DE VENTURI.....	34
5	RESULTADOS.....	36
5.1	CUSTO PARA CONSTRUÇÃO DO SISTEMA PARA DETERMINAÇÃO DE VAZÃO.....	36
5.2	PERDA DE CARGA: EQUIVALÊNCIA LINEAR	40
5.3	EFICIÊNCIA DO DISPOSITIVO	40
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43

1 INTRODUÇÃO

Auferir e medir a vazão de fluidos, independentemente do dispositivo a ser utilizado, é uma necessidade primordial para o comércio, a indústria, ou até mesmo atividades rotineiras que necessitam de maior precisão nas quantidades que serão utilizadas.

Vários dispositivos podem ser utilizados para essa medição, destacando-se a técnica criada por Bernoulli, que utiliza o diferencial de pressão em áreas seccionais diferentes. Através dessa técnica, os medidores do tipo Venturi, cujo nome homenageia seu criador de origem italiana, Giovanni Battista Venturi, se apresentam como um dos métodos mais confiáveis no que se refere à medição de pressão de fluidos em geral.

De acordo com relatos históricos, o físico italiano Venturi nasceu em 1746, na cidade de Bibbiano. Desde cedo já apresentava sinais de inteligência notoriamente superior aos demais colegas de classe. Formado pela Universidade de Modena onde posteriormente passou a ministrar aulas de física experimental, Venturi foi o responsável pela construção de pontes, barragens, modificação de cursos d'água, além dos famosos tubos de medição Venturi.

Somada a sua confiabilidade, a relativa facilidade de confecção, bem como o baixo custo de materiais envolvidos no projeto, além da irrisória perda de carga, os medidores do tipo Venturi

Todas essas características levaram à escolha desse tipo de medidor que funciona medindo a velocidade de escoamento e vazão de um líquido de acordo com a variação de pressão desse mesmo líquido em um tubo de seção mais larga e por outro de seção mais estreita.

Desse modo, a explicação para essa teoria se dá a partir do Teorema de Bernoulli, representada por uma equação que descreve o modo como os fluidos se comportam em movimento no interior de tubos.

Portanto, o desenvolvimento teórico desta monografia se divide em cinco capítulos, iniciando a partir da demonstração dos objetivos gerais e específicos. Em seguida, a revisão bibliográfica elencará conceitos básicos de vazão volumétrica,

tipos de medidores de vazão, em especial o tubo Venturi, além de uma breve explanação acerca do Teorema de Bernoulli.

Por conseguinte, o quarto capítulo é destinado à apresentação dos materiais e métodos utilizados para a confecção do medidor Venturi, onde serão demonstrados, dentre outros fatores, os métodos de calibração e de avaliação necessários para a finalização do dispositivo.

Por sua vez, o quinto capítulo se destina a apresentar os resultados obtidos após a construção do medidor Venturi, bem como os custos financeiros destinados à sua confecção, a calibração necessária para seu real funcionamento, dentre outros aspectos como a perda de carga e a eficiência do mesmo.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

- Construção de um medidor de vazão do tipo Venturi para medida de vazão volumétrica.

2.2 OBJETIVOS ESPÉCIFICOS

- Desenvolver uma metodologia experimental para o cálculo de vazão em escala laboratorial.

- Aplicar as técnicas encontradas na literatura acerca da utilização correta do dispositivo, principalmente no que se refere à sua calibração e ativação.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 VAZÃO VOLUMÉTRICA

Pode ser definida como a quantidade de volume que escoar através de um espaço por um tempo determinado (FOX ; MCDONALD, 2001).

A vazão volumétrica é aferida através de um instrumento capaz de medir o volume ou a massa de determinado fluido, que é transportado através de uma tubulação em um determinado período de tempo (GÉRARD, 2003).

A vazão, portanto, poderá se dar de forma volumétrica, que varia de acordo com o volume dentro da unidade de tempo, ou mássica, que varia de acordo com a massa dentro da unidade de tempo (GÉRARD, 2003).

Desse modo, como forma de facilitar a visualização da vazão volumétrica, é possível estabelecer uma tabela, onde são apresentadas as conversões entre unidades que poderão ser utilizadas:

A forma de medida mais utilizada em todo o mundo é a realizada por intermédio de elementos primários deprimogênicos, por placas de orifício. Apesar de ser uma técnica antiga, a sua versatilidade faz com que seja utilizada em grande escala no cenário industrial (GÉRARD, 2003).

3.2 TIPOS DE MEDIDORES DE VAZÃO

Tendo conhecimento acerca da vazão volumétrica, faz-se necessário estabelecer meios para medir a sua quantidade. Desde os tempos mais remotos, quando se iniciou a possuir demanda por água, seja em função da navegação, irrigação, ou até mesmo consumo próprio, já se pensava em formular técnicas de medição de volume e vazão de líquidos (LEE, 2003).

Em função disso, as mais básicas teorias da hidráulica de medição que se conhece hoje foram desenvolvidas por volta do século XVII, por cientistas como Torricelli e Venturi, que deu nome ao medidor que será objeto desta pesquisa.

Apesar de os medidores terem evoluído de acordo com o desenvolvimento da tecnologia, a maioria dos métodos de medição são baseados de acordo com a

variação do nível de água, para os condutos livres, ou de acordo com a variação da pressão, para os condutos forçados (LEOPOLDO ; SOUZA, 1979).

3.2.2 Tipo turbina

Os medidores tipo turbina são comumente utilizados para medir a vazão de fluidos de baixa densidade, ou até mesmo de gases. Esse tipo de instrumento se destaca dos demais em função de sua precisão e confiabilidade, sendo o mais adequado em situações onde a exata medição de determinada substância faz-se necessária (MARCO ANTÔNIO RIBEIRO, 2008).

O medidor tipo turbina funciona promovendo a saída através de pulsos, proporcionalmente à frequência de vazão dos fluidos a serem medidos. Desse modo, a substância atravessa a turbina, fazendo girar um rotor na mesma proporção da vazão do fluido que ali está passando (MARCO ANTÔNIO RIBEIRO, 2008).

A confiabilidade nas medições desse tipo de dispositivo faz com que o mesmo seja utilizado em serviços que demandam exatidão na contagem das quantidades, como por exemplo, nas indústrias petroquímica e alimentícia (MARCO ANTÔNIO RIBEIRO, 2008).

Figura 1: Medidores de vazão do tipo turbina



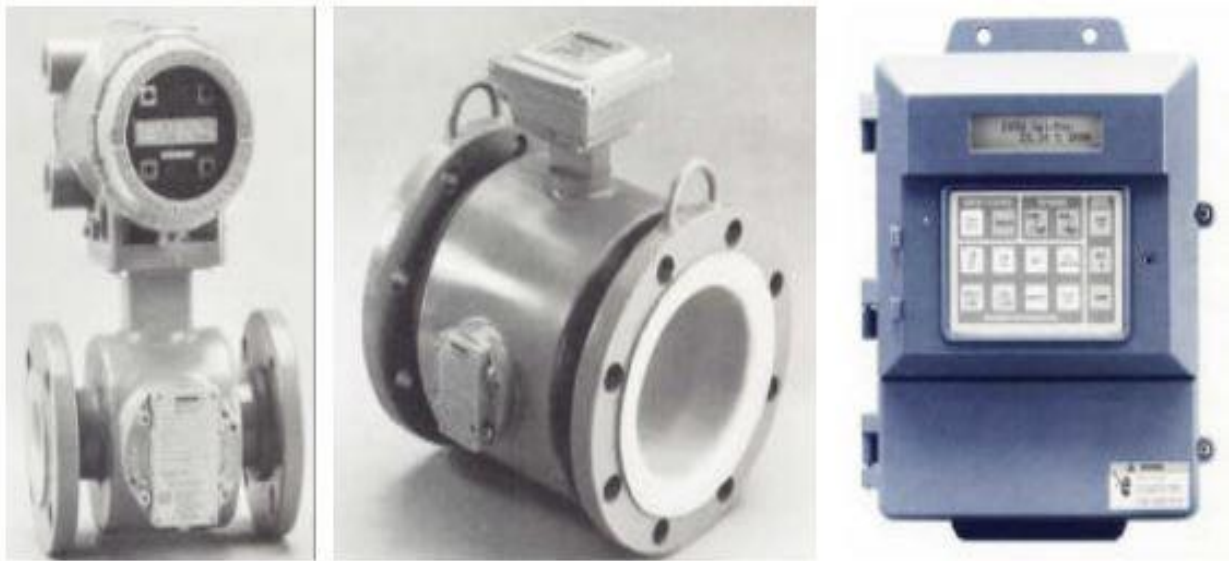
Fonte: MARCO ANTÔNIO RIBEIRO, 2008.

3.2.3 Eletromagnéticos

Medidores eletromagnéticos representam o que há de mais flexível em termos de medição de fluidos. Esse título se dá principalmente em função da sua baixa perda de carga, ocasionada pela inexistência de obstruções. Sua aplicação se dá essencialmente em fluidos condutores de eletricidade, sendo ideal para medir a vazão de produtos corrosivos ou ainda aqueles que possuem resíduos sólidos em sua composição (MARCO ANTÔNIO RIBEIRO, 2008).

Baseado na Lei de Faraday onde “sempre que um objeto condutor se move em um campo magnético, uma força eletromotriz é gerada”, os medidores eletromagnéticos não possuem obstruções e apresentam perda de carga semelhante a um trecho de tubulação reta. É uma boa opção para fluidos pouco viscosos, entretanto, é a única alternativa para substâncias que contém partículas sólidas (MARCO ANTÔNIO RIBEIRO, 2008).

Figura 2: Medidores eletromagnéticos



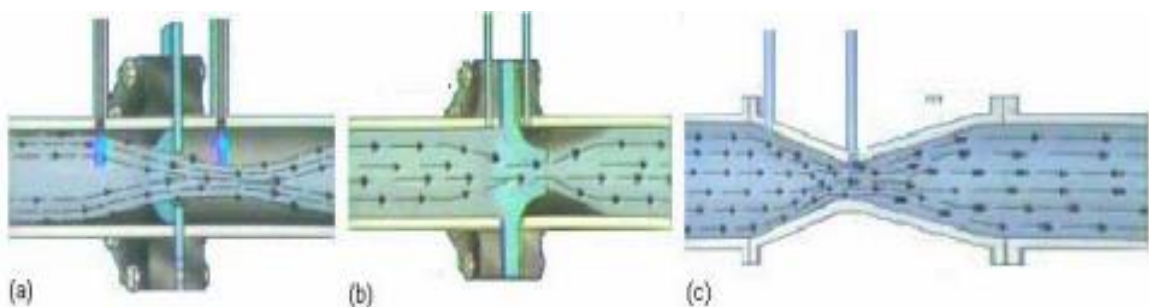
Fonte: TESLA, 2003

3.2.4 Por diferencial de pressão

Praticamente metade dos equipamentos que utilizam condutos forçados são constituídos por esse tipo de medidor. Dentre eles, destaca-se o Venturi, que possui o melhor desempenho dentre os medidores de obstrução (SCHNEIDER ; TESLA, 2003).

A figura abaixo demonstra os três tipos de medidores de vazão, desta categoria, mais utilizados:

Figura 3: Medidores de vazão (diferencial de pressão): a – Orifício; b – Bocal; c – Venturi.



Fonte: TESLA, 2003.

Esse tipo de medidor possui uma característica marcante: De forma a aumentar a velocidade de escoamento, ele reduz o tamanho da tubulação para produzir maior pressão (SCHNEIDER ; TESLA, 2003).

Além disso, pelo menos sete em cada 10 medidos de vazão utilizados na indústria sejam do tipo por diferencial de pressão. Suas características influenciam na escolha, embora tenha menos precisão que os outros medidores, possui fácil construção, baixo custo e funcionalidade com diversos tipos de fluidos (GÉRARD, 2003).

Comparando as placas de orifício com o Venturi, é possível afirmar que, enquanto as primeiras possuem um custo menor e são mais fáceis de construir, ainda apresentam menor perda de carga residual (GÉRARD, 2003). Essa comparação é melhor visualizada através da figura abaixo, onde é possível verificar a porcentagem de perda de carga do diferencial de pressão em função do diâmetro das seções contraídas e plena:

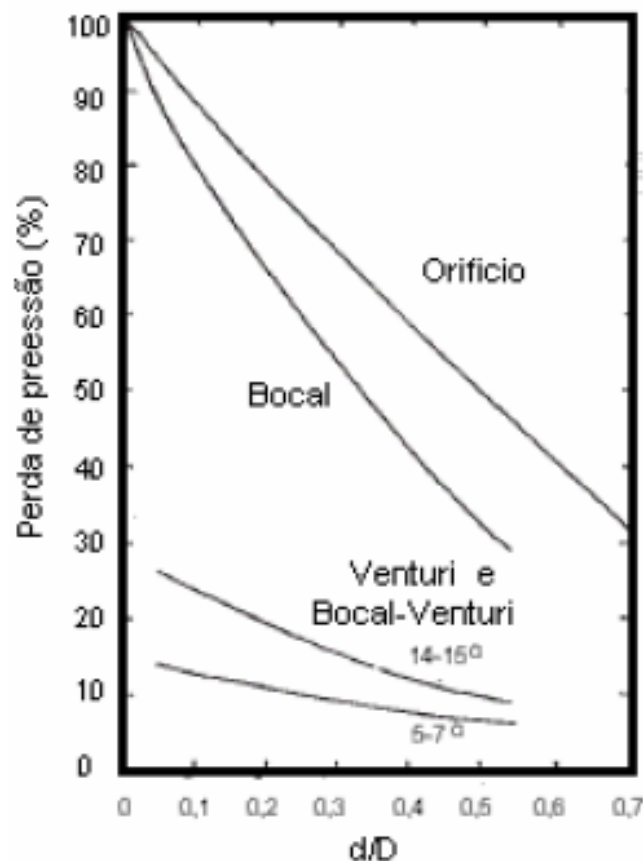


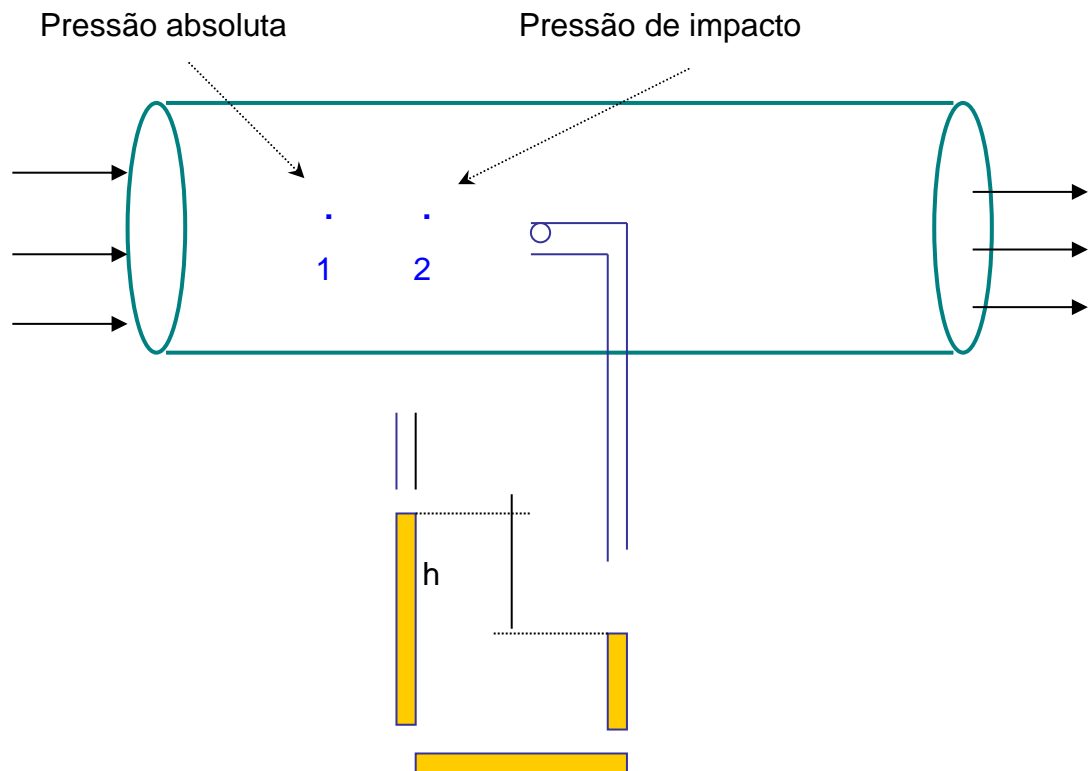
Figura 4: Perda de carga entre o diâmetro da garganta (d) e tubulação principal (D)

Fonte: GÉRARD, 2003.

Apesar dos pontos negativos, o medidor Venturi é o que acarreta uma menor perda de carga, sendo altamente recomendável quando não se tem energia disponível para ser desperdiçada (GÉRARD, 2003).

3.2.4.1 Tubo de Pitot

Os Tubos de Pitot servem para medir a velocidade local ou em determinado ponto pela análise do diferencial entre as pressões de impacto e absoluta.



$$P_2 > P_1 \quad \therefore \quad Z_1 = Z_2 \quad \therefore \quad v_1 > v_2 = 0$$

Desse modo, aplicando Bernoulli entre os pontos "1" e "2":

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + z_2 \quad \therefore \quad v_1^2 = 2g \left(\frac{P_2 - P_1}{\gamma} \right)$$

Aplicando o balanço hidrostático:

$$P_2 - P_1 = h(\gamma_{fm} - \gamma_f) \quad \therefore \quad v_1^2 = 2gh \frac{(\gamma_{fm} - \gamma_f)}{\gamma_f}$$

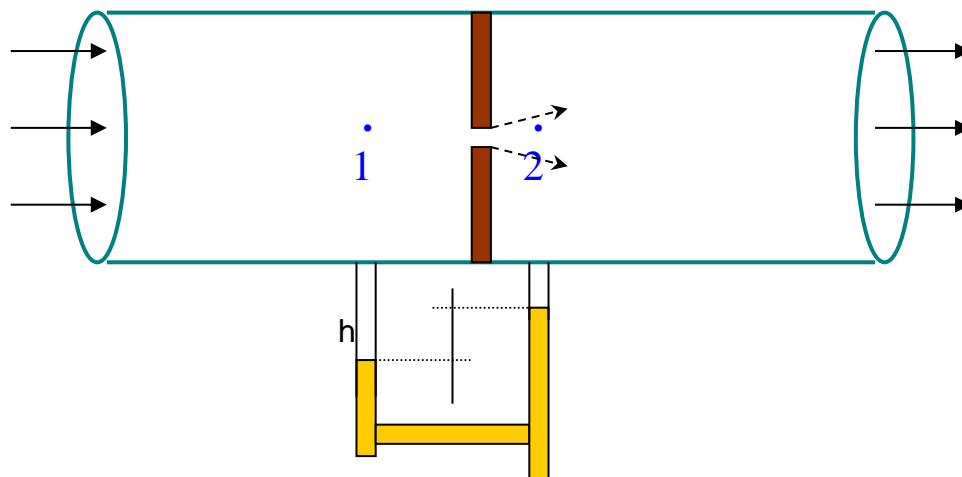
$$V_1 = \sqrt{2gh \left(\frac{\gamma_{fm}}{\gamma_f} - 1 \right)} \quad \text{ou} \quad V_1 = \sqrt{2gh \left(\frac{P_{fm}}{P_f} - 1 \right)}$$

Nas situações onde a água seja o fluido encontrado nas tubulações:

$$V_1 = \sqrt{2gh (d_{fm} - 1)}$$

Desse modo, os tubos de Pitot tem como objetivo auferir a velocidade de uma corrente líquida em determinado ponto.

3.2.4.2 Placa de Orifício



$$P_1 > P_2 \quad \therefore \quad Z_1 = Z_2 \quad \therefore \quad V_2 > V_1$$

Aplicando Bernoulli entre os pontos "1" e "2":

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho_f g} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho_f g} + z_2 \quad \therefore \quad \frac{P_1 - P_2}{\rho_f} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2}$$

Pela equação da continuidade, temos:

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad \therefore \quad v_1 = \frac{v_2 A_2}{A_1}$$

$$v_2^2 - \frac{v_2^2 A_2^2}{A_1^2} = \frac{2}{\rho_f} (P_1 - P_2) \quad \therefore \quad v_2^2 \left(1 - \frac{A_2^2}{A_1^2} \right) = \frac{2}{\rho_f} (P_1 - P_2)$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho_f \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]}} \quad (I)$$

Pelo balanço hidrostático temos que:

$$P_1 - P_2 = h(\gamma_{fm} - \gamma_f)$$

Substituindo o balanço hidrostático na equação (I), temos:

$$V_2 = \sqrt{\frac{2gh \left(\frac{P_{fm}}{P_f} - 1 \right)}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2}}$$

O Medidor Orifício opera de acordo com o mesmo princípio que o Medidor Venturi, mas possui algumas importantes diferenças. Dentre elas, destacam-se a facilidade de mudança da placa para acomodar vazões diferentes, enquanto que o diâmetro do estrangulamento de um Venturi é fixo. Outra característica informa que

a placa tem queda brusca de pressão, enquanto que no Venturi as seções cônicas diminuem a pressão de forma gradativa.

3.2.4.3 Medidor Venturi

Desenvolvido em 1881 pelo italiano Clemmens Herschel, o medidor Venturi é capaz de operar não somente com fluidos, mas também com gases e vapor, podendo, assim, ser aplicado em medições de combustão em caldeiras, água em dutos de grandes proporções ou até mesmo gases onde seja necessário o mínimo de perda de carga permanente (TESLA, 2003).

De acordo com a figura abaixo, é possível verificar as aplicações recomendadas para o medidor de pressão Venturi, em comparação com os demais.

Figura 5: Comparativo das aplicações padrão entre os medidores de pressão

Medidor	Diâmetro (polegadas)	Líquidos				
		Limpo	Viscoso	Sujo	Corrosivo	
¼ círculo	> 1 ½	A	A	B	B	
Orifício	Entrada cônica	> 1 ½	A	A	B	B
	Excêntrico	> 2	B	C	A	B
Venturi	> 2	A	B	B	B	
Bocal	> 2	A	B	B	B	

A= recomendado B= normalmente aplicado C= não recomendado.

Fonte: TESLA, 2003.

Como verificado, o medidor do tipo Venturi é bastante recomendado para medir fluidos que possuem uma concentração de sólidos muito grande, principalmente em função da sua não retenção de partículas (TESLA, 2003).

Desse modo, o medidor Venturi deve ser utilizado, preferencialmente, em posição horizontal. Por essa razão, apesar de seu custo alto com relação aos outros medidores, é bastante utilizado em tubulações com diâmetro extenso. A sua

durabilidade, facilidade na montagem e baixo nível de perda de carga justificam a escolha (DELMEE, 1982).

Em razão da sua ineficiência no que se refere à captação de partículas, o medidor de pressão do tipo Venturi é altamente recomendável para auferir a vazão de fluidos que possuem uma grande taxa de concentração de resíduos sólidos (BERNARDO, 1995).

Apesar de possuir um custo relativamente baixo, quando aplicado em grande escala, esse tipo de medidor tende a sofrer uma multiplicação nos custos de operação e produção. Embora esse fato seja um empecilho plausível, ainda assim o custo benefício do medidor Venturi se faz presente, principalmente em função de suas vantagens com relação aos outros medidores, como perda de carga reduzida e fácil montagem (BERNARDO, 1995).

No que se refere à construção, os tubos do tipo Venturi podem ser fabricados a partir de qualquer material, desde que respeitadas as dimensões recomendadas para tal. Por exemplo, para tubulações com até 800mm de diâmetro, a utilização de medidores com cone de fundição é suficiente. Entretanto, para tamanhos maiores a recomendação é que o material utilizado seja proveniente de metal soldado. Dependendo do tamanho, também podem ser utilizados o bronze, fibra de vidro, aço e titânio (BERNARDO, 1995).

Dessa forma, utiliza-se latão ou bronze para tubulações menores que 50mm de diâmetro. Entre 50mm e 1200mm é recomendado o uso de cone convergente usinado. Em dimensões maiores faz-se a recomendação pela utilização de aço fundido, além da confecção através de cones convergentes em chapas soldadas. Para tamanhos maiores, concreto pode ser utilizado para cobrir as partes metálicas como forma de dar mais suporte à grande vazão de fluidos (TESLA, 2003).

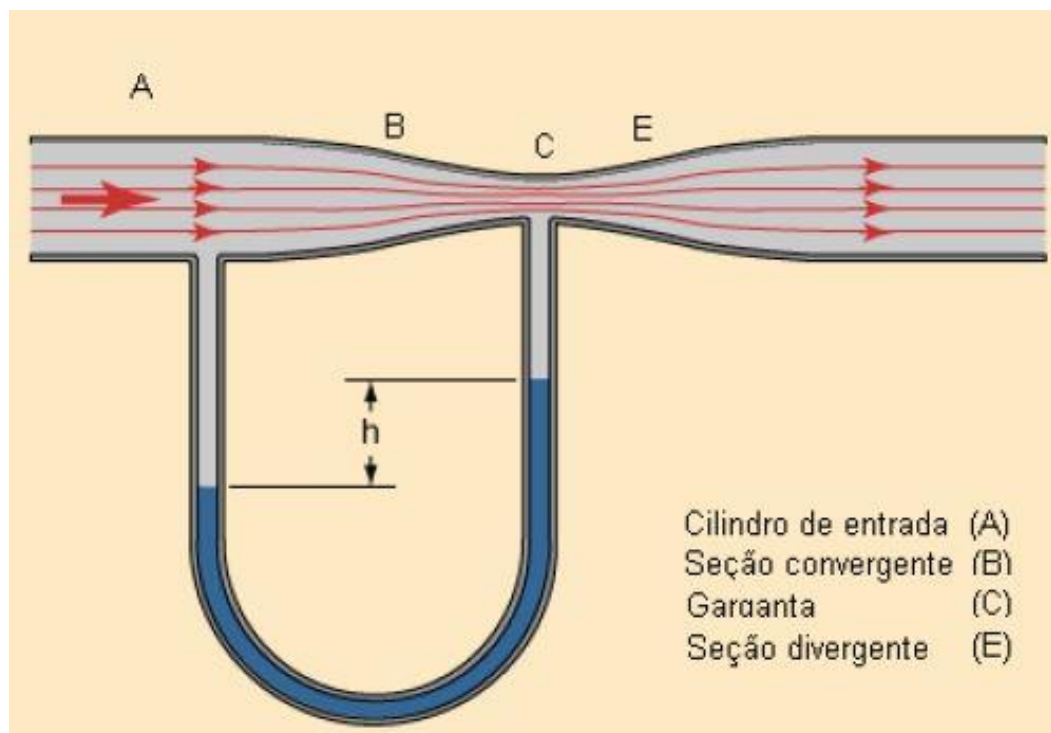
Quando comparado com outros medidores, como as placas de orifício, por exemplo, o Venturi é capaz de medir vazões até 60% maiores, perdendo apenas 20% de carga. Apesar de possuir um custo maior que o de um diafragma, sua precisão é bem superior (TESLA, 2003).

O funcionamento do medidor Venturi é simples: Ele acelera o fluido para baixar a pressão através de uma tubulação cilíndrica que possui duas seções em

forma de cone, uma convergente (21°) e outra divergente (entre 5 e 7°) (ONOFRE, 2003).

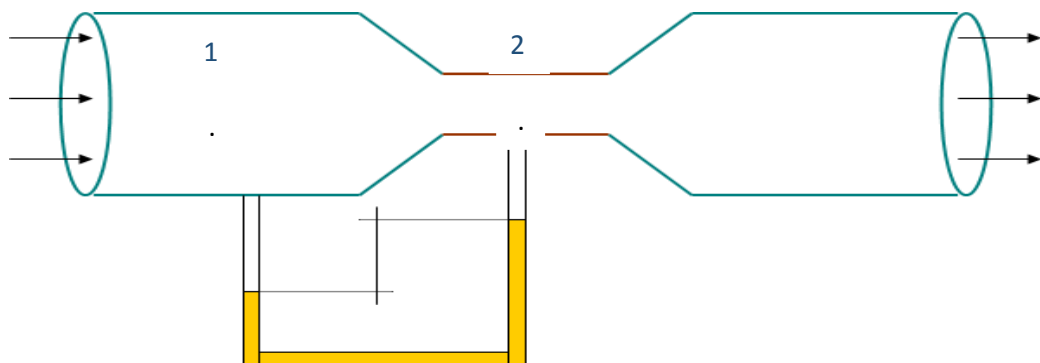
É recomendável que seja adotado, para o cilindro inicial (de entrada) o mesmo comprimento do diâmetro da tubulação, de forma a diminuir os custos operacionais, como pode ser observado na figura a seguir:

Figura 6: Modelo recomendado para um medidor Venturi



Fonte: ONOFRE, 2003.

3.3 TEOREMA DE BERNOULLI



Fonte: GÉRARD, 2003.

$$P_1 > P_2 \quad \therefore \quad Z_1 = Z_2 \quad \therefore \quad v_2 > v_1 \quad \therefore \quad A_2 > A_1$$

$$\begin{array}{l}
 Q_1 = A_1 \cdot V_1 \longrightarrow V_1 = \frac{Q_1}{A_1} \\
 Q_2 = A_2 \cdot V_2 \longrightarrow V_2 = \frac{Q_2}{A_2}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \searrow \\
 \nearrow
 \end{array}
 Q_1 = Q_2 = Q$$

Em seguida, trazendo os ensinamentos de Bernoulli entre os pontos 1 e 2, teremos:

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + z_2 \quad \therefore \quad \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g} = \frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g}$$

$$v_2^2 - v_1^2 = \frac{2}{\rho_f} (P_1 - P_2) \quad \therefore \quad \left(\frac{Q_2}{A_2} \right)^2 - \left(\frac{Q_1}{A_1} \right)^2 = \frac{2}{\rho_f} (P_1 - P_2)$$

$$Q^2 \left(\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2} \right) = \frac{2}{\rho_f} (P_1 - P_2) \quad \therefore \quad Q^2 \left(\frac{A_1^2 - A_2^2}{A_2^2 A_1^2} \right) = \frac{2}{\rho_f} (P_1 - P_2)$$

$$Q = \frac{A_2 A_1}{\sqrt{A_1^2 - A_2^2}} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{\rho_f}} \quad ; \quad \text{onde } K = A_2 A_1 \sqrt{\frac{2}{A_1^2 - A_2^2}}$$

$$Q = K \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{\rho_f}}$$

3.3.1 Considerações gerais

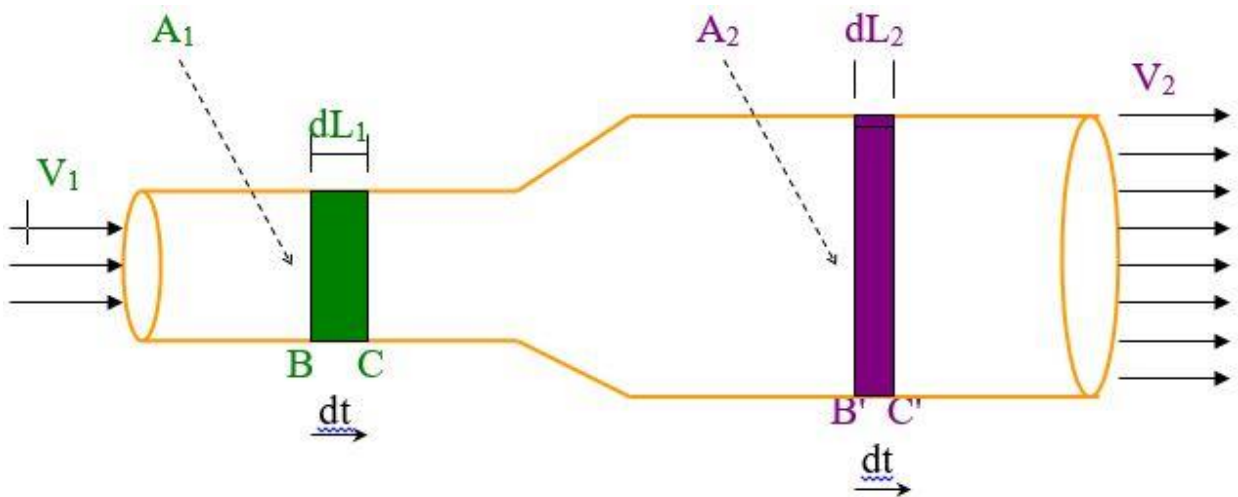
Daniel Bernoulli, importante físico suíço, fixou um princípio bastante prático para o escoamento de fluidos que se utiliza até hoje. “Se a velocidade de uma

partícula de um fluido aumenta enquanto ela escoar ao longo de uma linha de corrente, a pressão do fluido deve diminuir e vice versa” (BERNOULLI, 1738).

Partindo para um exemplo prático, ao visualizar um tubo horizontal com diâmetros diferentes que esteja escoando água, nas seções onde a água se mova mais rápido, a pressão será menor do que nas áreas onde o líquido esteja se movendo devagar (GÉRARD, 2003).

3.3.2 Equação de Bernoulli

Figura 7: Equação da continuidade



Fonte: GÉRARD, 2003.

Ainda segundo o físico, é possível estabelecer que em condições ideais, onde não haja atrito e nem viscosidade, a energia do fluido permanece constante por todo o percurso. Esta, por sua vez, é composta por três elementos: A cinética, caracterizada pela energia que move o fluido; o potencial gravitacional, caracterizado pela energia referente à altitude que o fluido se encontra; e a energia de fluxo que é a energia concernente à pressão do fluido (GÉRARD, 2003).

A partir desses elementos foi possível estabelecer a “Equação de Bernoulli”:

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} = Z_2$$

Desse modo, “Z” diz respeito à cota geométrica, ou seja, a quantidade de potencial de energia por unidade de peso de cada partícula. “P/y” diz respeito à energia referente à pressão obtida por cada unidade de peso da partícula, também conhecida como cota piezométrica. Por sua vez, “ $v^2/2g$ ” seria a cota cinética, representada pela energia cinética de cada unidade peso da partícula (GÉRARD, 2003).

Para que a equação seja válida, são necessários alguns requisitos como fluido ideal e incompressível, regime permanente, total sujeição ao campo gravitacional além de variações isotérmicas (GÉRARD, 2003).

4 MATERIAL E MÉTODO

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Para a confecção do dispositivo, foram utilizados os seguintes materiais:

Tabela 1: Lista de materiais utilizados no projeto

QUANTIDADE	MATERIAL
01	Chuveiro
01	Registro 32mmx20mm
04	Redução 1"
08	Joelho 1"
04	União 1"
03	Adaptador 1"
01	Tê 1"
02	Registro 50mmx32mm
01	Registro 1x1/2"
01	Válvula com crivo
02	Nipples 1"
01	Bomba centrífuga 0,5cv
01	Tubo de venturi
01	Rotâmetro
01	Caixa de vidro 40cmx40cmx50cm
01	Caixa d'água 300l
01	Spray de tinta preta
01	Spray de tinta ouro
02	Tubos de cola
02	Folhas de lixa
01	Disjuntor 25AP

Fonte: Autor 2018.

4.2 MÉTODO DE CALIBRAÇÃO

Como forma de efetuar a devida calibração do dispositivo, foram utilizadas leituras em tréplicas para cada vazão preestabelecida. A cada minuto, uma determinada vazão (vinte, trinta ou quarenta litros) foi comparada ao resultado adquirido.

Após a leitura de cada vazão, respectivamente, foram realizadas comparações com os equipamentos (rotâmetro e reservatório de vidro) já validados.

4.2.1 Arranjo matemático para se chegar a uma equação favorável ao equipamento desenvolvido é dado por:

$$Q = Q_1 = Q_2$$

$$VA = V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2$$

Da equação de Bernoulli sabemos que:

Equação 1:
$$\frac{V_1^2 - V_2^2}{2} = \frac{P_1 - P_2}{Pf}$$

Equação 2:
$$V_1^2 - V_2^2 = \frac{2 \cdot (P_1 - P_2)}{Pf}$$

Entretanto, já sabemos que:

Equação 3:
$$V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2$$

Logo:

Equação 4:
$$V_1 = \frac{V_2 \cdot A_2}{A_1}$$

Desse modo, substituindo a equação 4 na equação 2, temos:

$$V_2^2 - \left(\frac{V_2 \cdot A_2}{A_1} \right)^2 = \frac{2 \cdot \Delta P}{Pf}$$



$$V_2^2 - \frac{v_2^2 \cdot A_2^2}{A_1^2} = \frac{2 \cdot \Delta P}{Pf}$$



$$V_2^2 \cdot \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right] = \frac{2 \cdot \Delta P}{Pf}$$



Equação 5:

$$V_2 = \frac{2 \Delta P}{Pf \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]}$$

Sabemos que:

$$Pf = \frac{100 \text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^4}$$

$$A_2 = \frac{\pi \cdot D_2^2}{4}$$

$$A_1 = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4}$$

D1 = 50mm ~ 0,05m

D2 = 25mm ~ 0,025m

Equação 6:

$$A_2 = \frac{\pi \cdot (0,025)^2}{4} = 0,000490875 \text{ m}^2$$

Equação 7:

$$A_1 = \frac{\pi \cdot (0,05)^2}{4} = 0,0019635 \text{ m}^2$$

Desse modo, substituindo o valor “Pf” das equações 6 e 7, na equação 5, teremos:

$$V_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P \left(\frac{kgf}{m^2}\right)}{\frac{100kgf S^2}{m^4} \cdot \left[1 - \left(\frac{0,000490875 m^2}{0,0019635 m^2}\right)^2\right]}}$$



$$V_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P (kgf/m^2)}{\frac{100kgf S^2}{m^4} \cdot [1 - (0,25)^2]}}$$



$$V_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P (kgf/m^2)}{100 \cdot (1 - 0,0625)}}$$



$$V_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P (kgf/m^2)}{100 \cdot 0,9373}}$$

$$V_2 = \sqrt{0,021333 \cdot \Delta P (kgf/m^2)}$$



$$V_2 = \sqrt{0,021333} \times \sqrt{\Delta P (kgf/m^2)}$$



$$V_2 = 0,1460593373 \times \sqrt{\Delta P (kgf/m^2)}$$

Portanto, sabendo que:

$$1 \text{ kgf/m}^2 \text{ _____ } 0,073556147 \text{ mmHg}$$

$$x \text{ _____ } y$$

$$x = \frac{y \cdot \text{mmHg}}{0,073556147} = 13,60$$



$$V_2 = 0,1460593373 \times \sqrt{13,60 \cdot \Delta P \text{ (mmHg)}}$$



$$V_2 = 0,1460593375 \times \sqrt{13,60} \cdot \sqrt{\Delta P \text{ (mmHg)}}$$



$$V_2 = 0,1460593375 \times 3,6878177829 \cdot \sqrt{\Delta P \text{ (mmHg)}}$$

$$V_2 = 0,538640 \times \sqrt{\Delta P \text{ (mmHg)}} \text{ (m/s)}$$

4.2.2 Área da tubulação do sistema

Sabemos que:

- Tubo 32mm = 0,032m.

Portanto:

$$Q_t = V_2 \cdot A_t$$

$$A_t = \frac{\pi D^2}{4} \cong \frac{3,1416}{4} \times (0,032)^2$$

$$A_t = 0,00080419 \text{ m}^2$$

$$Q_t = 0,538640 \times 0,00080419 \text{ m}^2 \times \sqrt{\Delta P \text{ (mmHg)}}$$

$$Q_t = 0,538640 \times 0,00080419 \times 60.000 \times \sqrt{\Delta P \text{ (mmHg)}}$$

Desse modo, temos a equação final para determinação da vazão em litros por minuto no tubo de Venturi: $Q_t = 25,9853 \times \sqrt{\Delta P \text{ (mmHg) L/m}}$

4.3 MÉTODO DE CALIBRAÇÃO DO TUBO DE VENTURI

Como forma de proceder os ajustes necessários para calibração e operação do tubo de Venturi, os procedimentos utilizados consistiram em, inicialmente, adaptar o manômetro nos respectivos locais. Em seguida, verificou-se o nível da água no reservatório (caixa d'água) para que fossem abertos todos os registros do sistema.

Por conseguinte, o dispositivo foi iniciado para que o sistema entrasse em regime de equilíbrio. Após a certificação de que não há cavitação no rotâmetro, iniciou-se o processo de regulação da vazão desejada. Para isso, utilizou-se o registro do *by pass*.

Após todas as regulagens, verificou-se a leitura do manômetro para, em seguida, utilizar a equação " $Q_t = 25,9853 \times \sqrt{\Delta P \text{ (mmHg)}}$ " para descobrir a vazão de líquido em litros por minuto. Feito todo esse procedimento, restou apenas comparar as três vazões.

Figura 8: Momento de validação: Equipamento em funcionamento



Fonte: Autor, 2018

5 RESULTADOS

5.1 CUSTO PARA CONSTRUÇÃO DO SISTEMA PARA DETERMINAÇÃO DE VAZÃO

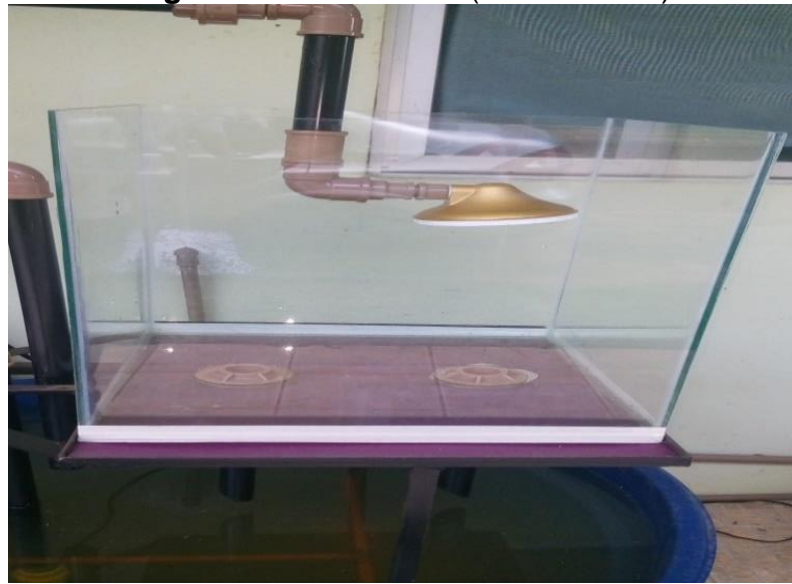
A seguir, uma descrição dos custos financeiros referentes ao material utilizado na construção do equipamento:

TABELA 2: Custo financeiro para elaboração do projeto

MATERIAL	CUSTO
Tubo de Venturi	R\$400,00
Rotâmetro	R\$876,00
Manômetro	R\$ 758,00
Reservatório de vidro	\$170,00
Caixa d'água	R\$125,00
Bomba 0,5CV	R\$ 155,00
Base para sustentação	R\$85,00
Tubulação, peças e conexões	R\$328,00
Tinta Spray	R\$30,00
Lixa	R\$6,50
TOTAL	R\$2933,50

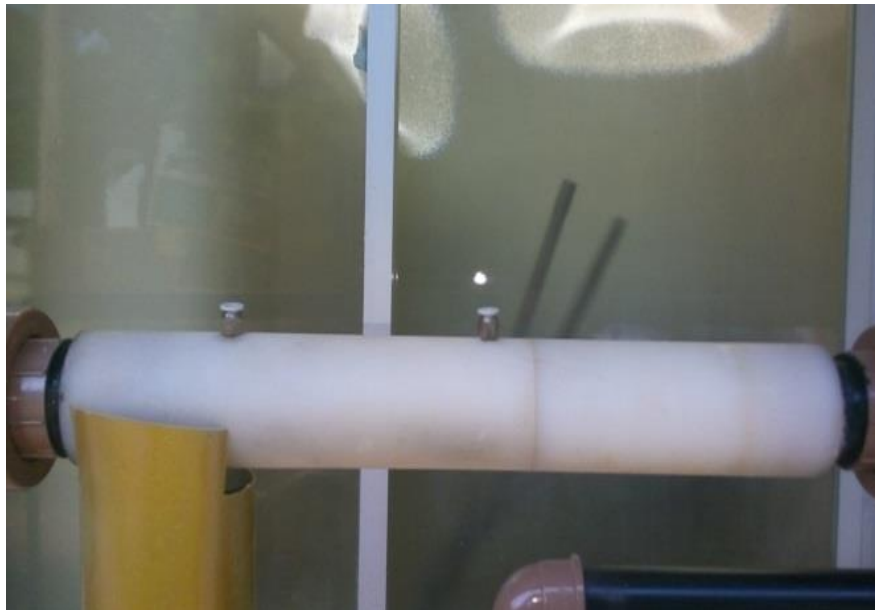
Fonte: Autor, 2018.

Figura 9: Reservatório (40x40x50cm)



Fonte: Autor, 2018

Figura 10: Tubo de Venturi



Fonte: Autor, 2018

Figura 11: Rotâmetro



Fonte: Autor, 2018

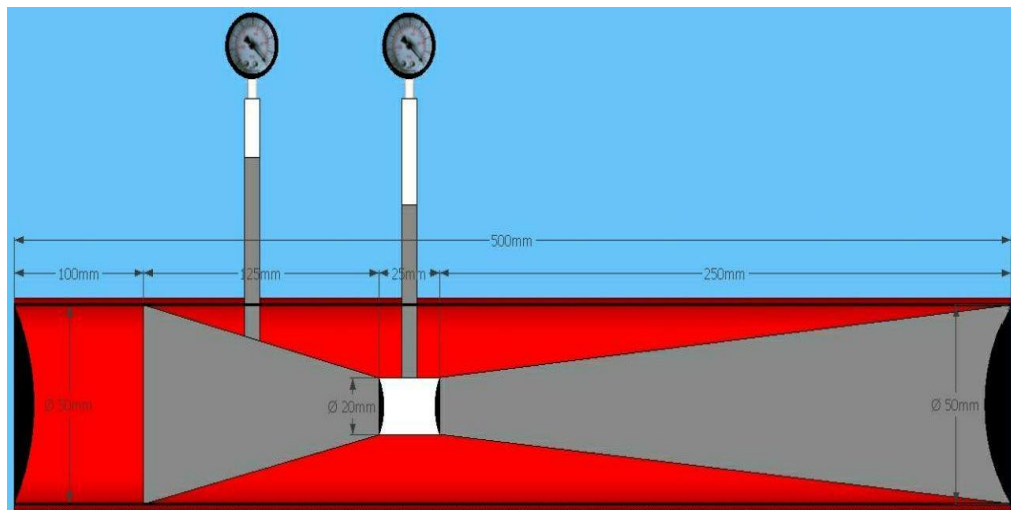
Figura 12: Conjunto motor/bomba 0,5cv (SOMAR)



Fonte: Autor, 2018

Figura 13: Manômetro diferencial

Fonte: Autor, 2018

Figura 14: Parte interna do dispositivo

Fonte: Autor, 2018

5.2 PERDA DE CARGA: EQUIVALÊNCIA LINEAR

A perda de carga ou a energia resulta do atrito interno do líquido, isto é, da sua viscosidade, da resistência oferecida pelas paredes em virtude de sua rugosidade nas alterações das trajetórias impostas pelas peças e dispositivos intercalados na tubulação (MACINTYRE 2010).

Tabela 3: Perda de carga

QTD	PEÇAS	PESO UNT. (K)	PESO TOTAL (K)
01	Chuveiro	0,1	0,1
01	Red. 32x20mm	0,15	0,15
04	Luva 1"	0,04	0,16
08	Joelho 1"	2	16
02	União 1.1/2	0,05	01
03	Adaptador 1"	0,15	0,45
01	Tê 1"	0,9	0,9
02	Red. 50x32mm	0,15	0,3
02	Registro G.A 1"	0,2	0,4
01	Válvula de pé com crivo	10	10
01	Tubo de Venturi	2,5	2,5
01	Rotâmetro	2,5	2,5
TOTAL:			18,06M/M

Fonte: Autor, 2018.

5.3 EFICIÊNCIA DO DISPOSITIVO

De acordo com medições experimentais para obtenção do coeficiente de descarga "cd":

$$cd = \frac{Qm \text{ real}}{Qm \text{ teórica}}$$

Desse modo, “ Q_m real” é obtido através da cubagem do reservatório de vidro. Por sua vez, a “ Q_m teórica” é obtida através do manômetro diferencial acoplado ao tubo de Venturi.

Tabela 4: Eficiência do dispositivo

Q_m Real (L)	ΔP (mmHg)	Q fluxômetro	Q teórico	cd
37,264	1,8	40 (L)	34,862 (L)	1,068
27,378	1,1	30 (L)	27,253 (L)	1,004
16,731	0,4	20 (L)	16,434 (L)	1,018

Fonte: Autor, 2018.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A relativa facilidade de construção de um medidor de vazão do tipo Venturi pôde ser observada, assim como a maioria dos autores relatam em suas obras.

Também foi possível observar que, mesmo com uma construção artesanal, esse tipo de medidor de vazão, após a devida calibração, possui uma boa precisão em seus resultados, fazendo comprovar mais uma vez outra característica presente na maioria das obras bibliográficas.

Portanto, é possível afirmar que o dispositivo construído cumpriu bem a sua função, de modo que a perda de carga se demonstrou aceitável com relação à vazão em litros por minuto.

Outro ponto importante a ser notado diz respeito à calibração do dispositivo que se mostrou semelhante às medições do rotâmetro e da cubagem da caixa de vidro, tomadas como referência para calcular a eficiência do medidor Venturi construído.

Analisando as condições de construção do dispositivo, facilidade de aquisição dos itens, bem como os resultados obtidos, é possível concluir que a construção, mesmo que amadora de um medidor de vazão do tipo Venturi, é economicamente e tecnicamente viável com relação da análise custo vs benefício, através de itens de construção encontrados de maneira viável no mercado em geral, e por último e não menos importante se trata de uma construção ambientalmente correta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERNARDO, S. *Elementos de irrigação*. 6. Ed. Viçosa: UFV, 1995.

DELMEE, G. J. *Manual de medição de vazão*. 2. Ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1982.

FOX, R.W. e MCDONALD, A.T.. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*, 5ª Edição, Editora LTC, 2001.

GALLI, M.; ONOFRE, R.M. *Medição de vazão*. Disponível em <<http://www.professorelmo.pop.com.br/vazao.pdf>>. Acesso em 28 jan. 2018.

GÉRARD, Jean Delmée. *Manual de Medição de Vazão*. 3ª edição – São Paulo: Edgard Blucher, 2003.

IBARS, Rubén Alcides Franco. *Desenvolvimento e avaliação de tubos Venturi para medição de vazão*. Piracicaba-SP, 2004.

LEE, J. *Open channel flow measurement*. Disponível em <<http://water.wku.edu/wastewater/readingroom/OpenChannelFlowMeasurement.pdf>>. Acesso em 27. Jan. 2018.

LEOPOLDO, PR.R; SOUSA, A.P. *Hidrometria: Medição de vazão*. Botucatu: UNESP, 1979.

MACINTYRRE, ARCHIBALDE JOSEF. *Instalações Hidráulicas: Prediais e Industriais*. 4 ed. Rio de Janeiro. 2010

ONOFRE, R. W. *Medição de vazão*. Disponível em <<http://www.professorelmo.pop.com.br/vazao.pdf>>. Acesso em 18. Jan. 2018.

PORTO, R.M. *Hidráulica básica*. 2 ed. São Carlos. USP, 1999.

SCHNEIDER, P. *Medição de pressão e vazão em fluidos*. Disponível em <http://www.geste.mecanica.ufrgs.br/pss/medterm/Pressao_vazao.pdf>. Acesso em 02 mar. 2018.

TESLA. Caudal. Disponível em <<http://tesla.cuao.edu.co/Variables/CAUDAL.pdf>>. Acesso em 27. Jan. 2018.