

2

Fundamentos Teóricos

2.1

Medição de vazão

A medição de vazão é um dos mais importantes parâmetros para o controle de diversos processos, tais como nos ramos de energia (petrolífera e elétrica), medicina e farmácia, alimentos, etc. Neste capítulo estão relacionados e analisados alguns dos métodos para medição de vazão existentes no mercado.

Para se determinar a vazão de um fluido (Q) em geral relaciona-se a velocidade média do escoamento (V) com a área (A) da seção transversal à direção do escoamento. Estas variáveis podem ser relacionadas pela Eq.(1). Desta forma, a indicação dependeria simplesmente da determinação correta de A e da medição confiável de V .

$$Q = A \times V \quad (1)$$

Porém, a medição de vazão é afetada por outros elementos, os quais podem inferir à medição desta grandeza um elevado grau de complexidade.

A presença de sólidos em suspensão e bolhas deve ser levada em consideração para a medição de vazão, para cada condição de temperatura, pressão e massa específica. Do mesmo modo, se a velocidade é avaliada em um único ponto do interior da tubulação, a equação poderá resultar num valor de vazão maior do que o real, pois o correto seria considerar a velocidade média do fluido para aplicar na equação. Outros parâmetros, como a existência de sólidos em suspensão, pressão, temperatura, viscosidade e densidade, também influenciam no processo de medição de vazão.

A seguir são descritos alguns medidores de vazão de uso mais frequente.

a) O medidor do tipo Pressão Diferencial é um medidor muito empregado no mercado. Algumas características justificam o alto uso deste aparelho, tais como tecnologia conhecida, custo relativamente baixo, ausência de partes móveis,

pouca necessidade de manutenção e aplicação adequada para muitos tipos de fluido. Todavia, o instrumento possui algumas limitações, tais como, faixa de medição muito restrita, sensibilidade a fluidos sujos e ao perfil de escoamento.

O princípio fundamental de todos os medidores de vazão que produzem uma pressão diferencial é a equação de Bernoulli, que pode ser apresentada conforme a Eq. (2). O primeiro termo da equação representa a energia de pressão e, o segundo, a energia cinética.

$$\left[\frac{P}{\rho} \right] + \left[\frac{V^2}{2} \right] = K = \text{Constante} \quad (2)$$

Desta equação conclui-se que, em uma tubulação fechada, não há perdas de energia, isto é, a energia se conserva.

O medidor de vazão mais comum a utilizar este princípio é o de Placa de Orifício, indicado na Fig. 7. Dados de entidades da área de instrumentação mostram que, nos Estados Unidos, cerca de 50% dos medidores de vazão usados pelas indústrias são desse tipo. No Brasil, também é de uso comum.

A faixa de incerteza de medição é de até 5% [5] do valor do fundo de escala do instrumento, considerando que o equipamento seja instalado nas condições ótimas de funcionamento, tais como fluido sem sólidos em suspensão, escoamento laminar, etc.

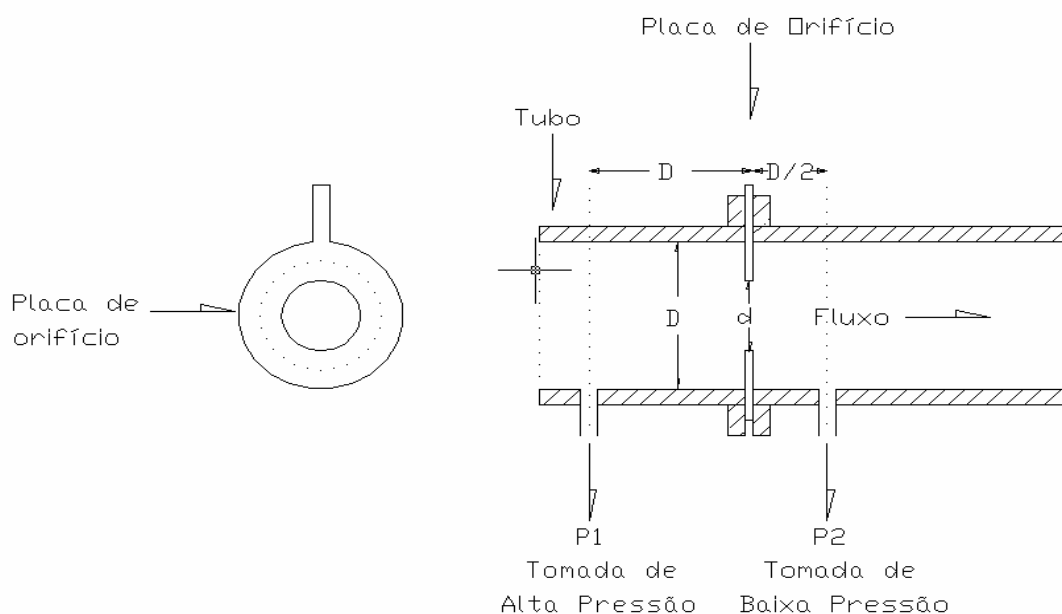


Figura 7 – Placa de Orifício.

b) Os medidores tipo deslocamento positivo apresentam-se sob muitos tipos de desenhos no mercado, como, por exemplo, engrenagens ovais, helicoidal, disco, palhetas, pistão, etc. Alguns tipos só podem ser utilizados em aplicações com líquidos, enquanto outros são mais apropriados para gases. Estes medidores são adequados para fluidos viscosos, ao contrário da maioria dos medidores. Possuem um preço de aquisição de baixo a médio valores. Porém, não são apropriados para pequenas vazões; seu custo de manutenção pode ser relativamente alto, não toleram partículas em suspensão e bolhas de gás afetam muito a exatidão.

O princípio de funcionamento do medidor tipo deslocamento positivo, o qual está ilustrado na Fig. 8, consiste na passagem de um volume definido de líquido ou gás por uma engrenagem ou disco sem, teoricamente, nenhum deslizamento de fluido durante esta passagem.

Normalmente, os ímãs embutidos nos rotores geram um número fixo de pulsos para cada revolução das partes móveis. O sinal de pulsos detectados é diretamente proporcional à vazão volumétrica que atravessa o medidor.

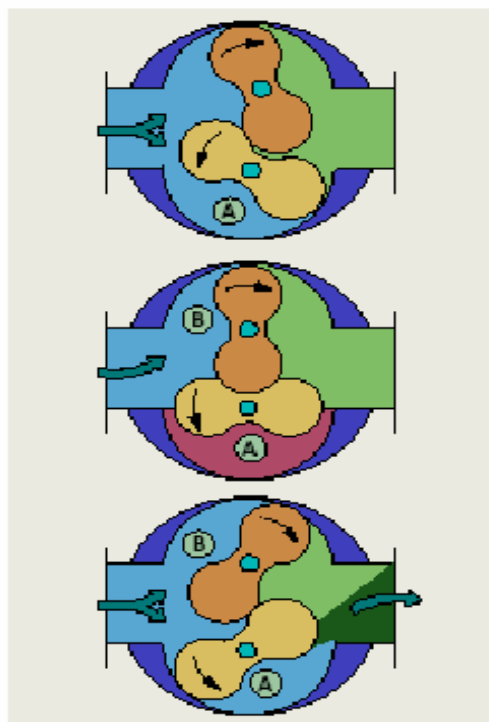


Figura 8 – Medidor Tipo Deslocamento Positivo [12]

A faixa de incerteza de medição é de até 0,5% [5] do valor do fundo de escala do instrumento, considerando que o equipamento seja instalado nas condições ótimas de funcionamento, tais como fluido sem sólidos em suspensão, etc.

c) Os medidores eletromagnéticos, esquematizados na Fig. 9, têm a vantagem da virtual ausência de perda de pressão, mas só podem ser usados com líquidos condutores de energia elétrica. O transmissor de vazão magnético instalado na tubulação entre flanges é composto, basicamente, do tubo cilíndrico, bobinas fixadas no tubo para geração do campo magnético e eletrodos fixados perpendicularmente ao campo.

O princípio de medição deste aparelho está representado na Fig. 9, e se baseia na lei de Faraday, isto é, quando um condutor elétrico se move num campo magnético cortando as linhas de campo forma-se uma F.E.M (Força Eletromotriz) no condutor, a qual é proporcional à velocidade do condutor. A F.E.M. induzida (FEM) no líquido, segundo a lei de Faraday, pode ser expressa pela Eq. (3):

$$FEM = K \times B \times V \times D \quad (3)$$

sendo K a constante do instrumento, B a intensidade do campo magnético, V a velocidade média do escoamento e D a distância entre os eletrodos.

A tensão U induzida neste meio é diretamente proporcional à velocidade média do escoamento V. A indução magnética B (intensidade de campo magnético) e a distância entre os eletrodos D (diâmetro nominal do tubo) são constantes. Então a F.E.M induzida é função da velocidade do líquido, que é proporcional à vazão volumétrica de saída.

A faixa de incerteza de medição é de até 0,5% [5] do valor do fundo de escala do instrumento, considerando que o equipamento seja instalado nas condições ótimas de funcionamento, tais como fluido sem sólidos em suspensão, escoamento laminar, etc.

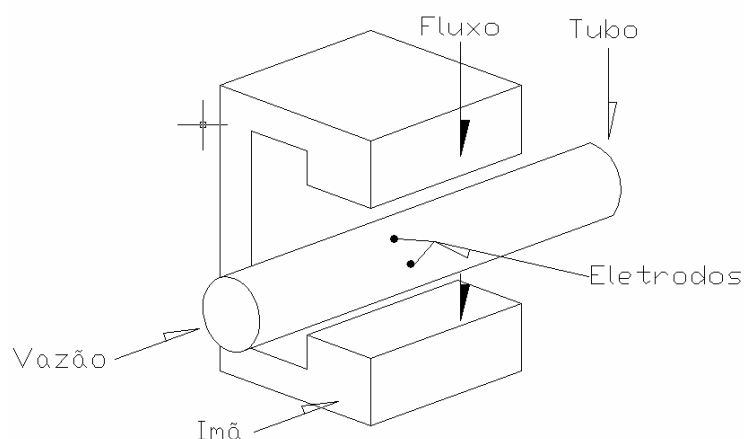


Figura 9 – Medidores do Tipo Eletromagnético.

Estes medidores acima citados não são adequados ao processo existente nas Usinas da LIGHT e portanto, não são utilizados neste tipo de aplicação. Nelas, para supervisão de sistemas, já se utilizou três tipos de medidores de vazão, cujos resultados não foram satisfatórios, devido à obstrução do escoamento provocada pelo acúmulo de material orgânico existente na água de resfriamento. Tais instrumentos foram os medidores tipo turbina, chaves de vazão tipo palheta e medidores tipo ultra-som, conforme mencionado no capítulo 1, e que seguem detalhados abaixo.

d) Nos medidores do tipo turbina, Fig. 10, o volume total do líquido que passa através de uma turbina é proporcional à velocidade do fluido, e, conseqüentemente, à vazão. Este mecanismo aciona um rotor ligado a uma bobina magnética, gerando pulsos de acordo com a sua rotação. Tais pulsos estão relacionados ao volume do fluido que passa instantaneamente pela turbina.

Verificou-se, nas Usinas da LIGHT, que o acúmulo de material orgânico existente na água causa o mal funcionamento das turbinas, alterando a rotação das mesmas, afetando no resultado do medidor ou, até mesmo, travando o medidor.

A faixa de incerteza de medição é de até 5% [12] do valor do fundo de escala do instrumento, considerando que o equipamento seja instalado nas condições ótimas de funcionamento, tais como fluido sem sólidos em suspensão, escoamento laminar, etc.

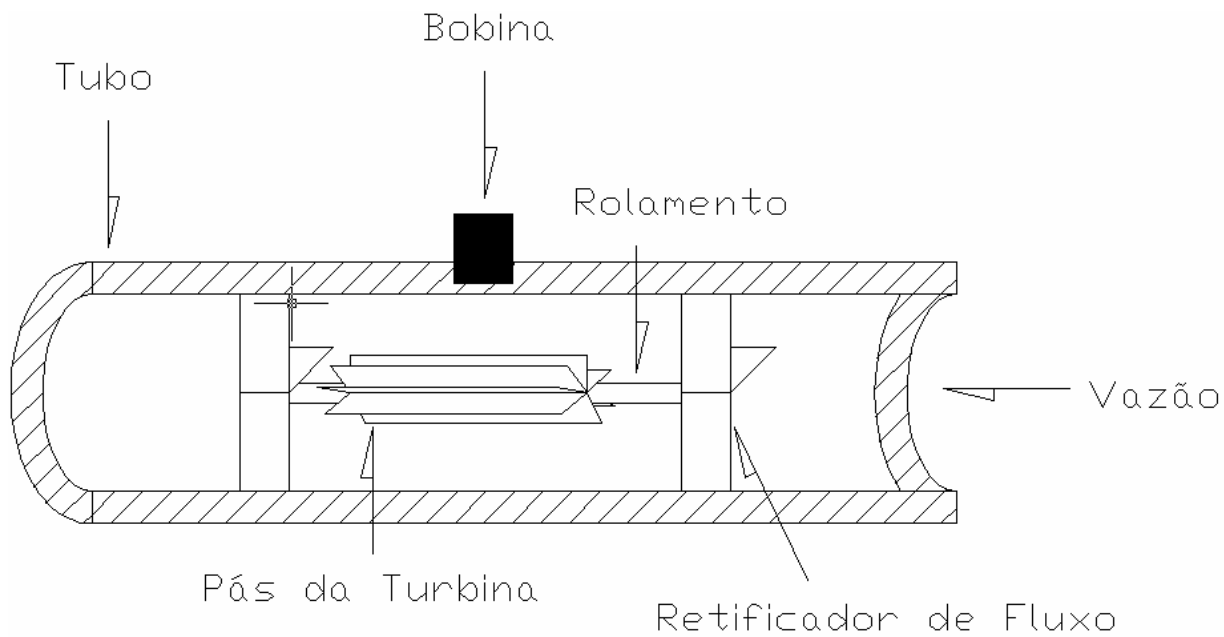


Figura 10 – Medidor de Vazão Tipo Turbina.

e) O medidor do tipo palheta detecta apenas a existência ou não de escoamento, disponibilizando um contato seco para os sistemas de supervisão. O escoamento, neste medidor, atravessa um anteparo denominado palheta, o qual está ligado a uma mola que, por sua vez, exerce uma força contrária ao sentido do escoamento. Quando existe vazão suficiente para vencer a resistência da mola, a palheta se move e aciona um contato seco.

A faixa de incerteza de medição é de aproximadamente 10% [12] do valor do fundo de escala do instrumento.

De forma semelhante ao medidor tipo turbina, verificou-se que o acúmulo de material orgânico existente na água causa o mal funcionamento deste equipamento, causando o travamento da palheta. Além disso, a palheta sofre um desgaste pelo contato com a grande quantidade de sólidos em suspensão existentes na água.

f) O medidor tipo ultra-som, utiliza ondas de som para determinar a vazão dos fluidos. Os pulsos de um transdutor se propagam através do fluido em escoamento e, a velocidade do som no meio fornece uma indicação da velocidade do fluido. Conforme ilustrado na Fig. 11, dois transdutores em posições opostas

são montados de modo que as ondas que se propagam entre eles estejam em um ângulo de 45 graus no sentido do escoamento.

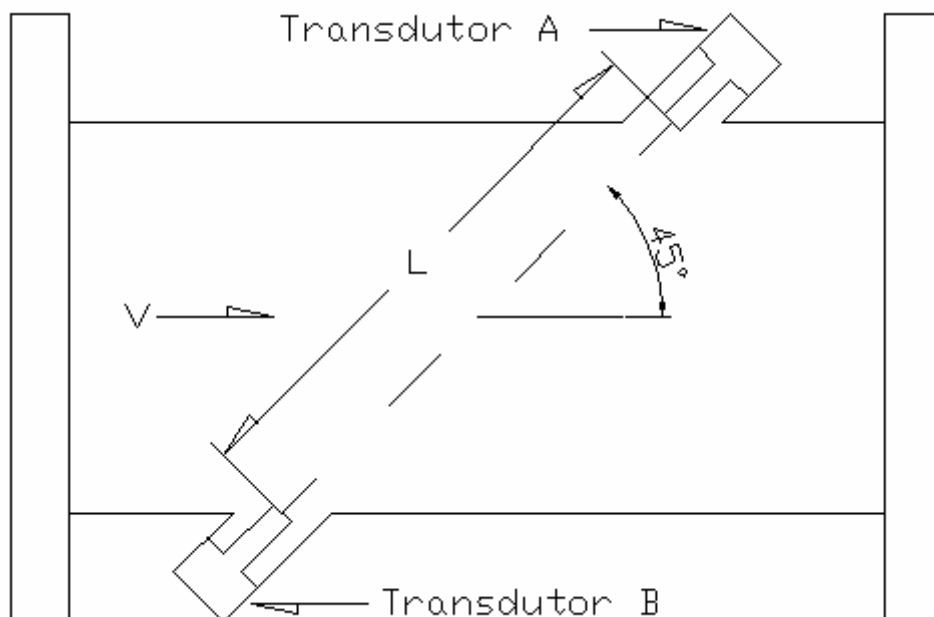


Figura 11 – Medidores de Vazão do Tipo Ultra - Som.

A velocidade do som, para se propagar do sensor superior para o inferior, será um somatório da velocidade do som no meio com a contribuição devido à velocidade do fluido. Da mesma forma, a velocidade do som, para se propagar do sensor inferior para o sensor superior adjacente, será igual à velocidade do som no meio menos a velocidade do fluido. Este método é afetado pela existência de gases e sólidos em suspensão, pois estes alteram o tempo de propagação do sinal entre os sensores, causando erros de medição. Esta é a razão pela qual este equipamento não funciona adequadamente nas Usinas da LIGHT.

A faixa de incerteza de medição é de aproximadamente 0,5% [12] do valor do fundo de escala do instrumento, considerando que o equipamento seja instalado nas condições ótimas de funcionamento, tais como fluido sem sólidos em suspensão etc.

Estas experiências de busca de monitoramento de vazão com tais sensores levaram a LIGHT a procurar medidores não intrusivos ao escoamento e que seu resultado de medição não seja afetado pelo material em suspensão existente na

água. Por isso, dois medidores de vazão foram analisados: Medidores do tipo Vortex e Medidores do tipo força atuante sobre a tubulação.

O princípio de operação do medidor tipo Vórtex é baseado no fenômeno de formação de vórtices ilustrado na Fig. 12, conhecido como “Karman Vortex Street” (Cinturão de Vórtices de Von Karman). Durante um escoamento, quando um fluido atravessa um corpo cilíndrico, pode-se observar na sua esteira uma formação regular de vórtices que se movem nas direções horária e anti-horária com uma frequência constante. Mede-se a frequência de formação destes vórtices, a qual é proporcional à velocidade do fluido. O sinal de saída do medidor depende de um fator K que fornece esta proporcionalidade.

A faixa de incerteza de medição é de aproximadamente 0,75% [13] do valor do fundo de escala do instrumento, considerando que o equipamento seja instalado nas condições ótimas de funcionamento, tais como fluido sem sólidos em suspensão, número de Reynolds menor que 20.000, etc.

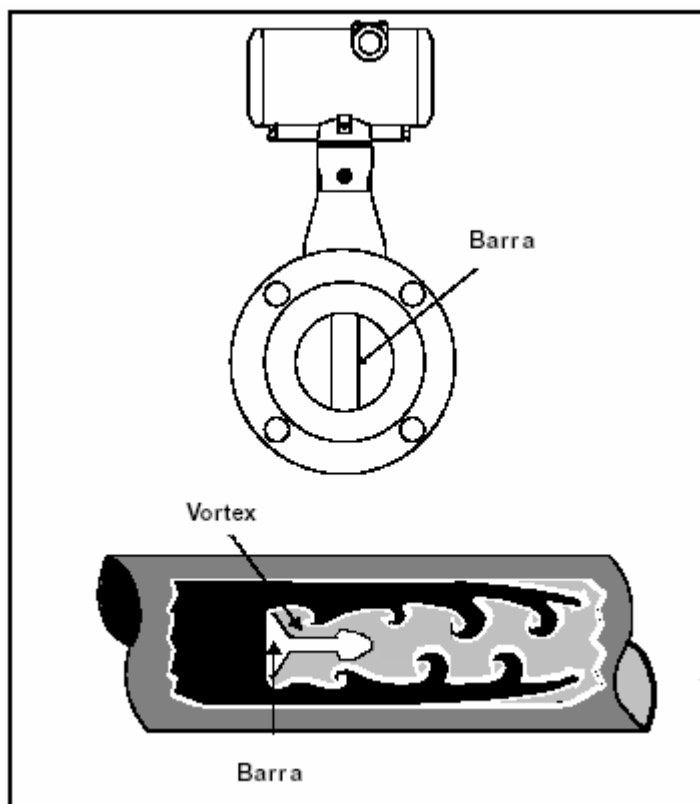


Figura 12 – Medidores de Vazão do Tipo Vórtex. [9]

O desafio do projeto aqui apresentado foi realizar a medição de vazão em circuitos de água de Usinas hidrelétricas da LIGHT, utilizando um equipamento de instalação externa à tubulação, ou seja, não intrusivo. Assim, pretende-se que sejam evitados os problemas de acúmulo de materiais e incrustações, bem como facilitar a operação e instalação do novo medidor, diminuindo as paradas dos circuitos de refrigeração e aumentando, por consequência, a disponibilidade dos geradores.

Neste intuito, foram pesquisados dois tipos de medidores, um utilizando-se um extensômetro resistivo, onde se mede a força atuante sobre uma tubulação (Coriolis) provocada pelo movimento do fluido e, outro, utilizando-se acelerômetros, cujos sinais detectados podem ser associados à formação e desprendimento de vórtices, semelhantemente ao que ocorre no medidor do tipo Vórtex, cujo princípio de funcionamento já foi descrito.

A vantagem do equipamento desenvolvido no projeto aqui apresentado, utilizando-se acelerômetros, com relação aos medidores de vazão do tipo Vortex existentes no mercado, é a instalação, que fica totalmente externa à tubulação onde ocorre o escoamento.

2.2

Sistema de medição de vazão com extensômetro

2.2.1

Princípio de Funcionamento do Extensômetro Resistivo

O Extensômetro resistivo é o método mais utilizado para medição de tensão e deformação em estruturas (concreto, pontes, trilhos de trens, aviões, etc.) . O princípio de operação do extensômetro baseia-se na deformação de um elemento resistivo quando se encontra afixado a um material sujeito a carregamento. A deformação é indicada pela medida da variação da resistência deste elemento sensor. As vantagens para utilizá-los neste caso é que estes instrumentos não deterioram, têm pequenas dimensões, custo relativamente baixo, dentre outras.

A deformação “ ε ” de um corpo é uma quantidade adimensional, definida pela Eq. (4):

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (4)$$

onde:

DL = acréscimo do comprimento da peça após carregamento

L = comprimento inicial entre dois pontos da peça.

A Fig. 13 mostra um corpo deformado pela atuação de uma força.

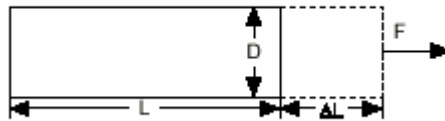


Figura 13 – Corpo Deformado por uma força de tração. [10]

Da lei de Hooke temos a relação entre a tensão e a deformação :

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (5)$$

onde:

E = módulo de elasticidade do material

Quando um material condutor está submetido à deformação, sua resistência elétrica varia de acordo com a Eq. (6):

$$r = \Omega \frac{L}{A} \quad (6)$$

onde:

r = resistência em Ohms;

L = comprimento do condutor;

A = seção transversal do condutor;

Ω = resistividade do condutor, que é em função da temperatura do condutor e das solicitações mecânicas a ele aplicadas.

Desta forma, se submetemos este condutor a uma solicitação mecânica (tração ou compressão) sua resistência irá variar, devido às variações dimensionais de seção e comprimento.

Então, devido a este comportamento dos condutores, para que se possa na prática obter valores de deformação, cola-se uma resistência de um fio numa camada de isolante muito fina (combinação de papel e plástico) sobre o objeto a ser deformado. A deformação pode ser determinada pela variação da resistência do fio, a qual pode ser medida.

Como detalhado em [14] , diferenciando-se a Eq. (6) e usando-se o coeficiente de Poisson do fio (μ), indicado na Eq. (7), pode-se escrever a deformação local em função da variação da resistência (dr/r) e de um fator de proporcionalidade (K), indicado na Eq. (8), que em geral é constante para uma ampla faixa de deformações num dado material.

$$\mu = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_L} \quad (7)$$

$$K = \frac{dr}{r} \frac{1}{\varepsilon_L} \quad (8)$$

onde:

ε_r = deformação na direção radial

ε_L = deformação na direção axial

Assim, a relação básica do extensômetro resistivo pode ser expressa como:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{K} \frac{\Delta r}{r} \quad (9)$$

onde,

K é a constante do extensômetro

Δr é a variação da resistência do extensômetro

r é a resistência do extensômetro não deformado

Quanto maior o valor de K para uma mesma deformação, maior será a variação de resistência, sendo portanto, mais fácil sua medição. O fator de proporcionalidade e a resistência são normalmente dados pelo fabricante de extensômetros.

A figura Fig. 14 mostra um aspecto típico dos extensômetros:

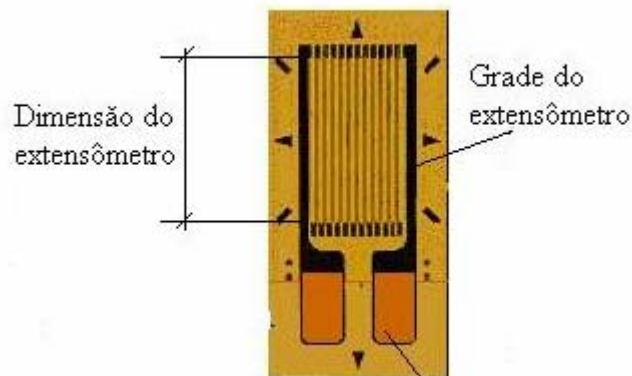


Figura 14 – Extensômetro Elétrico Resistivo. [10]

Como as variações nas resistências são pequenas, para que sejam captadas são necessários instrumentos muito sensíveis, geralmente faz-se a medição através de uma ponte de Wheatstone e avalia-se a variação da resistência transformando-a em variação de voltagem. No trabalho apresentado nesta dissertação foi utilizada a ponte de Wheatstone esquematizada pela Fig. 15.

2.2.2

Aplicação do extensômetro no Sistema de Medição de vazão

O princípio de medição considera uma tubulação com comprimento L , diâmetro interno D e área transversal da parede A , com uma extremidade engastada na parede. No interior do tubo escoo um fluido com vazão Q . Através de uma curva colocada na outra extremidade da tubulação, a direção do escoamento de fluido é desviada, conforme mostra a Fig. 20. Pelo teorema do momentum, uma força F é exercida sobre a tubulação, dando origem a uma tração que tende a aumentar seu comprimento de um valor ΔL . Estas variáveis podem ser relacionadas pela Eq. (10).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{F}{A.E} \quad (10)$$

onde E é o módulo de elasticidade do material da tubulação.

Desprezando-se a perda de carga no escoamento do fluido pela tubulação e, aplicando-se o teorema do momentum, a seguinte expressão pode ser escrita:

$$F = \rho.Q.V = \rho \frac{Q^2}{\frac{\pi}{4}.D^2} \quad (11)$$

onde ρ é a massa específica do fluido e V é a velocidade média na seção. Por outro lado, a relação básica do extensômetro resistivo pode ser expressa como:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{C} \frac{\Delta r}{r} \quad (12)$$

onde,

C é a constante do extensômetro (em torno de 2)

Δr é a variação da resistência do extensômetro

r é a resistência do extensômetro não deformado (usualmente 120 Ω)

Relacionando-se as Eq. (10), (11) e (12) pode-se obter uma relação entre a variação da resistência como função da vazão.

Um raciocínio semelhante pode ser utilizado para a deformação da curva do medidor.

2.2.3

Varição da resistência do extensômetro

Tabela 1: Valores dos parâmetros para projeto

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Vazão máxima	Q	m ³ /h	7
Diâmetro interno	D	in	1,610
Espessura da parede	L	in	0,145
Constante do Ext.	K		2,1
Módulo Young	Y	Psi	30 x 10 ⁶
Resistência do Ext. não deformado	r	Ω	120

Para o projeto do sistema de medição, os valores da tabela 1 foram utilizados, correspondentes à máxima vazão encontrada em campo, nos sistemas de refrigeração da Usina, para uma tubulação de 1,5 in (3,81mm) nominal.

Usando as Eq. (10), (11) e (12), juntamente com os dados da Tabela 1, os seguintes parâmetros podem ser calculados.

Tabela 2: Parâmetros Calculados

Parâmetro	Símbolo	Unidade
Área do escoamento	A_{flow}	m ²
Velocidade do fluido	V	m/s
Área transversal da parede	A	m ²
Força sobre o tubo	F	N
Deformação relativa	ε	μs
Variação de resistência	Δr	μΩ

Uma amplificação do sinal resultante foi conseguida através do uso de dois tipos básicos de circuitos :

- Divisor de tensão.
- Ponte de Wheatstone

Um equipamento que foi desenvolvido para viabilizar estas medições consta de uma ponte de Wheatstone, conforme ilustrado na Fig. 15, com duas resistências fixas no valor de $120\ \Omega$ cada, um extensômetro não deformado com resistência de $120\ \Omega$ e, um outro, com igual resistência para medir a deformação.

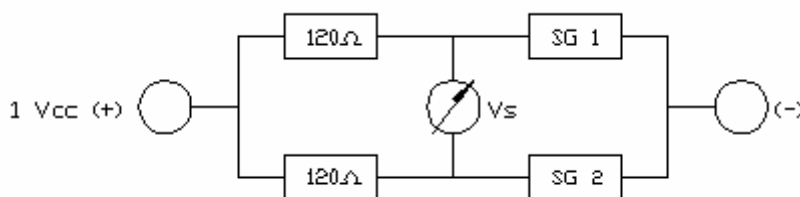


Figura 15 – Ponte de Wheastone.

A ponte foi alimentada por uma corrente constante I . A diferença de tensão (ΔV) entre dois vértices da ponte é proporcional à diferença de resistência dos extensômetros (Δr) e à corrente, conforme a expressão:

$$\Delta V = \frac{\Delta r \cdot I}{4} \quad (13)$$

Usando-se a variação de resistência calculada para a Tabela 2, a tensão pôde ser determinada pela Eq. (13) e amplificada, para que pudesse ser lida por um microvoltímetro.

2.3

Sistema de medição de vazão com acelerômetros

2.3.1

Princípio de Funcionamento do Acelerômetro

O princípio básico de funcionamento no qual está fundamentado o acelerômetro é o sistema de massa e mola representado na Fig. 16. As molas,

enquanto trabalham dentro da sua região linear, são governadas pela lei de Hooke, que diz que o deslocamento da mola (x), do ponto de repouso “0” ao ponto “X”, é proporcional à força nela aplicada (F), de acordo com a Eq. (14), onde (k) é uma constante inerente à mola.

$$F = k \times x \quad (14)$$

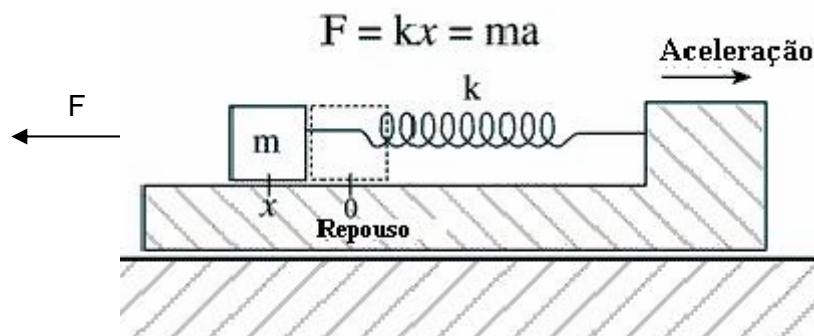


Figura 16 – Sistema de massa e mola usado para medir aceleração [11]

Outro princípio físico envolvido é a segunda lei de Newton, que relaciona força (F) com massa (m) e aceleração (a), segundo a Eq. (15).

$$F = m \times a \quad (15)$$

Utilizando-se as Eq. 14 e 15 verificou-se que o problema de medir aceleração tornou-se um problema de medir o deslocamento de uma massa.

O sistema utilizado pelo acelerômetro para medir o deslocamento está representado na Fig. 17, onde a placa central é equivalente à massa que se desloca, enquanto as outras duas placas permanecem fixas. Quando o circuito é alimentado e estiver sob aceleração, a placa central se move, mudando as capacitâncias C_A e C_B , pois a capacitância é inversamente proporcional à distância relativa entre as placas. Um equipamento mede a diferença entre as capacitâncias C_A e C_B . Quando não há deslocamento do sistema esta diferença é nula, significando que não há aceleração.

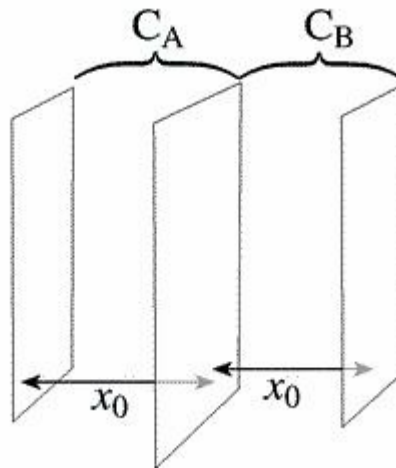


Figura 17 – Sistema de massa usado para medir aceleração [11]

De acordo com [11], quando há um deslocamento x , a diferença entre as capacitâncias é dada pela Eq. (16):

$$C_a - C_b = -\frac{2x}{X_0^2} \quad (16)$$

A variação de capacitância é disponibilizada nas saídas do acelerômetro em milivolts e em sinal de frequência.

2.3.2

Aplicação do acelerômetro no Sistema de Medição de vazão

O fenômeno físico a ser considerado na medição é a formação de vórtices quando existe a separação do escoamento em torno de uma superfície [8]. Uma partícula de fluido que se move na vizinhança da parede, dentro da camada limite, permanece sobre a influência do mesmo campo de pressão que existe fora desta camada, porque a pressão externa é imposta sobre a camada limite. Devido às grandes forças de atrito dentro da pouca espessa camada limite, esta partícula consome grande parte de sua energia cinética na sua trajetória, de forma que o restante é muito pouco para suplantarmos a elevação necessária de pressão quando o escoamento é desacelerado. Esta partícula não pode se mover muito longe dentro da região de pressão crescente, o que provoca eventualmente que seja arrastada pelas outras e um escoamento reverso aparece, dando origem a um vórtice. Este se desprende logo após esta região e se move na direção do escoamento principal. A

uma distância grande do corpo é possível observar uma formação regular de vórtices que se movem nas direções horária e anti-horária, formando o conhecido cinturão de vórtices de Von Kármán.

Durante o escoamento de um fluido em torno de um cilindro, a frequência com que estes vórtices se desprendem de sua superfície tem sido exaustivamente estudada por vários pesquisadores [8]. Para uma faixa grande de velocidade, viscosidade e diâmetro do cilindro, dois parâmetros adimensionais parecem descrever este fenômeno : o número de Strouhal (S) como função do número de Reynolds (Re). O primeiro é definido como função da frequência (n), diâmetro (D) e velocidade do escoamento (V). O número de Reynolds é definido como função da velocidade média do escoamento (V), do diâmetro (D) e da viscosidade (ν). Assim,

$$S = \frac{n.D}{V} \quad (17)$$

$$Re = \frac{V.D}{\nu} \quad (18)$$

O número de Strouhal varia com o número de Reynolds de forma crescente de 0 até aproximadamente $Re = 1200$ (Fig. 18). Para valores de Re maiores o número de Strouhal permanece constante em cerca de $S = 0,21$ até aproximadamente $Re = 4 \times 10^3$. A partir deste ponto ele decresce para $S = 0,18$. Para valores de Re em torno de 10^6 não existe uma formação regular de vórtices. Esta formação regular reaparece para números de Re extremamente altos ($Re > 3 \times 10^6$) quando o número de Strouhal permanece em torno de $S = 0,27$.

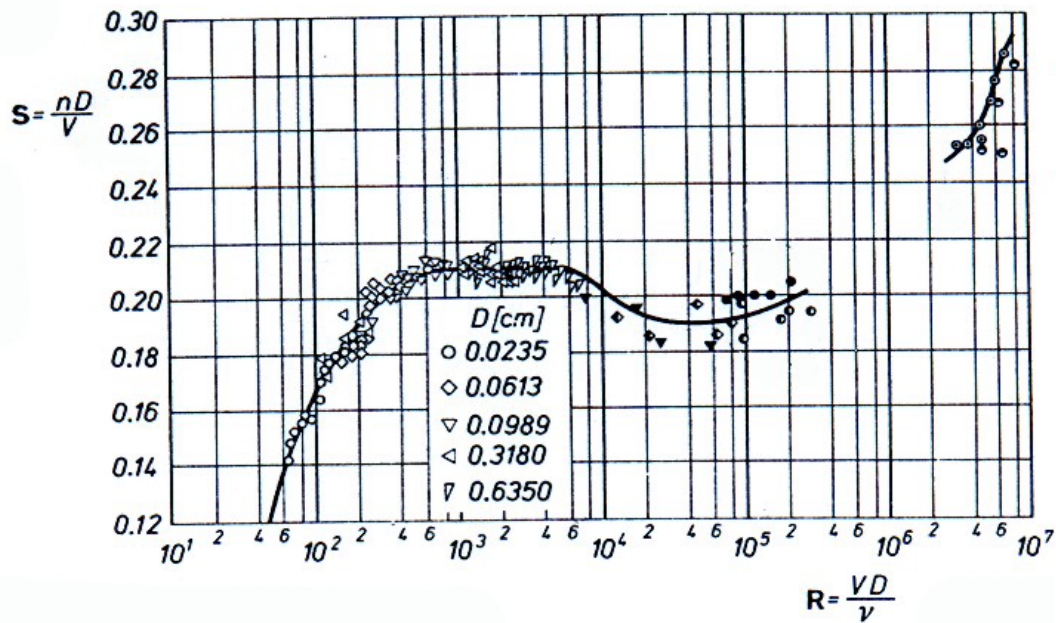


Figura 18 – Variação do número de Strouhal com o número de Reynolds para cilindros. [8]

Imaginou-se que, após um acidente na tubulação de escoamento de água, como a presença de uma válvula por exemplo, os vórtices sejam gerados após a passagem do fluido pela válvula, com uma frequência que é função da vazão. Este movimento dos vórtices é transmitido à tubulação, cuja frequência é medida com um acelerômetro.