

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais
Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais

MONOGRAFIA

**Elementos de Controle de Vazão, Nível e Pressão no Processo de Beneficiamento
de Minério de Ferro**

Aluno: André Massa Cipriani

Orientador: Prof. Roberto Galery

Julho 2013

André Massa Cipriani

**Elementos de Controle de Vazão, Nível e Pressão no Processo de Beneficiamento
de Minério de Ferro**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Minerais.

Área de concentração: Processamento de Minérios de Ferro.

Professor Orientador: Roberto Galery

Belo Horizonte
Universidade Federal de Minas Gerais
Julho 2013

C577e

Cipriani, André Massa.

Elementos de controle de vazão, nível e pressão no processo de beneficiamento de minério de ferro [manuscrito] / André Massa Cipriani. – 2013.

50 f., enc.: il.

Orientador: Roberto Galery.

Monografia apresentada à Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do Título de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Minerais.

Bibliografia: f. 50.

1. Minas e recursos minerais. 2. Beneficiamento de minério.
I. Galery, Roberto. II. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 622

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus pais e a Carolina,
que sempre me incentivaram, independente da distância.*

AGRADECIMENTOS

- Aos Professores do curso de especialização de beneficiamento de minério de ferro, pelo aprendizado e atenção oferecidos durante o curso.

- A Helenice Rabelo e a equipe da WorleyParsons, pelos ensinamentos e oportunidade de capacitação.

- Ao Prof. Roberto Galery, pela orientação no trabalho desenvolvido.

- Aos amigos que fiz durante o curso, e levarei para o resto da vida.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	8
2.	OBJETIVO E RELEVÂNCIA	9
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
3.1.	Controle de Processo no Beneficiamento do Minério de Ferro.....	10
3.2.	Tipos de Instrumentos Utilizados Para o Processo de Minérios de Ferro	11
3.3.	Sensores e Transmissores	12
3.4.	Unidades de Medidas	13
3.5.	Medidores de Vazão	14
3.5.1	Base da Dinâmica de Vazão	14
3.5.2	Instrumentos de Medição de Vazão.....	15
3.5.2.1	Medição com Sondas	17
3.5.2.2	Medidor Vortex	18
3.5.2.3	Medidor Ultrassom.....	19
3.5.2.4	Medidor Eletromagnético.....	21
3.5.2.5	Medidor Laser	23
3.6.	Medidores de Nível.....	25
3.6.1	Princípios.....	25
3.6.2	Instrumentos de Medição de Nível.....	25
3.6.2.1	Medidor por Pesagem.....	28
3.6.2.2	Medidor por Pressão Hidrostática.....	28
3.6.2.3	Sensores Capacitivos.....	31
3.6.2.4	Sensores Condutivos	32
3.6.2.5	Sensores Ultrassônicos.....	33
3.6.2.6	Medição por Radar	34
3.7.	Medidores de Pressão	35
3.7.1	Conceitos de Pressão	35
3.7.2	Instrumentos de Medição de Pressão.....	38
3.7.2.1	Sensores do Tipo Capacitivo.....	38
3.7.2.2	Sensores Piezoresistivos.....	40
4.	RESULTADOS OBTIDOS: MAPAS COMPARATIVOS	43
4.1.	Vazão	43
4.2.	Nível.....	44
4.3.	Pressão	46
5.	CONCLUSÃO.....	48
6.	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	49
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1: Controle de nível pelo operador	12
Figura 3-2: Variação de velocidade através da tubulação	15
Figura 3-3: Vazão através de um plano	15
Figura 3-4: Vazão laminar e vazão turbulenta.....	16
Figura 3-5: Tubo de Pitot e tubo de Prandtl	18
Figura 3-6: Esteira de Vórtices	19
Figura 3-7: Reflexão de ondas no medidor Doppler	20
Figura 3-8: Reflexão de ondas no medidor por tempo de trânsito	21
Figura 3-9: Medidor de vazão eletromagnético.....	22
Figura 3-10: Detalhes do medidor de vazão eletromagnético	23
Figura 3-11: Organograma do Medidor de Vazão Laser.....	25
Figura 3-12: Visor de vidro para monitoramento do nível.....	26
Figura 3-13: Medição de nível por borbulhamento	27
Figura 3-14: Montagem de chaves de nível em um tanque	27
Figura 3-15: Sensores de nível de solido com fluxo livre	28
Figura 3-16: Montagem de células de cargas para medição de nível.....	28
Figura 3-17: Transmissor/indicador de nível por pressão hidrostática.....	29
Figura 3-18: Medidor de nível por pressão diferencial em um tanque fechado	30
Figura 3-19: Sistema de medição de nível com borbulhador	31
Figura 3-20: Placas cilíndricas concêntricas em um sensor capacitivo.....	32
Figura 3-21: Montagem de Sensores Ultrassônicos	34
Figura 3-22: Faixa de medição de frequência no medidor de nível tipo radar.....	35
Figura 3-23: Relações de pressão	37
Figura 3-24: Tubos em U sem dif. de pressão (a) e com o lado esq. pressurizado (b)...	38
Figura 3-25: Sensor de pressão tipo capacitivo	39
Figura 3-26: Ilustração em 3D do sensor de pressão tipo capacitivo	39
Figura 3-27: Eletrodos e cristal de silício do sensor piezoresistivo	41
Figura 3-28: Princípios de deformação a partir de uma força externa	42
Figura 3-29: Configuração de um resistor integrado.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1: Unidades das grandezas básicas	14
Tabela 4-1: Mapa comparativo de medidores de vazão	44
Tabela 4-2: Mapa comparativo de medidores de nível.....	46
Tabela 4-3: Mapa comparativo de medidores de pressão.....	47

RESUMO

Com a crescente busca de qualidade, aliada com a grande preocupação com o meio ambiente, a saúde e segurança do empregado, as mineradoras têm aumentado consideravelmente as tecnologias para a produção minério de ferro beneficiado.

Este trabalho é realizado a fim de obter mapas comparativos para sugestões sobre quais tipos de instrumentos, vazão, nível e pressão, podem ser utilizados no processo de beneficiamento de minério de ferro.

Palavras-Chave: instrumentos, beneficiamento de minério de ferro, vazão, nível e pressão.

ABSTRACT

With the growing demand for quality, coupled with concern for the environment, the health and safety of the employee, the mine companies have increased considerably technologies for the iron ore processed.

This work is carried out in order to get comparative maps for suggestions on which types of instruments, flow, level and pressure, can be used in the process of iron ore.

Key-Words: instruments, iron ore process, flow, level and pressure.

1. INTRODUÇÃO

Paralelamente ao aumento de produção de minério de ferro, os padrões de qualidade também foram melhorados, e um dos principais responsáveis por essa condição foram os métodos desenvolvidos de automação e controle do processo beneficiamento de minério de ferro.

Para suprir o aumento desta produção, houve a necessidade de implantações de novas usinas de beneficiamento de minério de ferro com o uso de tecnologias de controle inovadoras, buscando sempre a excelência no produto final.

De fato, na mineração, as novas tecnologias podem ser inseridas no mercado através de equipamentos, controladores e instrumentos ou softwares de gerenciamento e monitoramento do processo.

Um dos pontos críticos no processo de beneficiamento de minério de ferro são as características físicas dos materiais que estão no processo. Portanto, existe uma grande preocupação sobre quais elementos de controle serão utilizados em determinada parte do processo produtivo, pois a escolha errada destes elementos pode reduzir a qualidade do produto final e gerar custos desnecessários para a empresa.

Assim, a escolha certa da instrumentação constitui um fator decisivo e de grande importância, pois seu nível desempenho e confiabilidade refletirão diretamente nos resultados finais do processo produtivo.

A escolha de cada tecnologia deve estar fundamentada nas características das variáveis de processo que serão controladas e na experiência do desempenho em aplicações similares de forma a garantir uma alta eficiência de operação com um reduzido grau de manutenção.

2. OBJETIVO E RELEVÂNCIA

O objetivo do presente trabalho é revisar a literatura e obter mapas comparativos entre instrumentos de vazão, nível e pressão, bem como determinar qual elemento de controle melhor se enquadra a determinada parte do processo de beneficiamento de minério de ferro.

É importante ressaltar que um erro na escolha do elemento de controle poderá acarretar em um produto de má qualidade e gerará custos para a empresa, e a elaboração dos mapas comparativos com qualidade diminui consideravelmente o erro na escolha.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A introdução e melhorias constantes da tecnologia auxiliam as indústrias a controlarem uma série de eventos para transformar um determinado material em seu produto desejado. Por exemplo, beneficiar o minério de ferro a fim de obter um produto com alto teor.

Nas usinas de beneficiamento mineral, os processos de controle eram originalmente realizados manualmente por operadores, fazendo com que o processo fosse totalmente dependente da intervenção humana, podendo ocasionar uma grande variação na qualidade do produto final.

Todavia, a instrumentação necessária para o controle dos processos foi sendo, ao longo dos anos, lentamente incluída. As indústrias perceberam a importância e a necessidade de terem sistemas de medições mais confiáveis e precisos, consistentes com a necessidade de se ter um controle do processo mais efetivo (Dunn, 2006).

A inclusão dos elementos de controle pode ser constatada desde a revolução industrial até os dias de hoje.

Atualmente, os controles de processos industriais encontram-se altamente evoluídos com controles micro computadorizados e elementos de controle altamente precisos.

3.1. Controle de Processo no Beneficiamento do Minério de Ferro

Controle automático representa um papel vital no avanço da engenharia e da ciência. Além de possuir importância extrema em sistemas de pilotagem de avião, mísseis guiados, veículos espaciais, etc., tornou-se uma parte integrante e importante dos processos industriais modernos. Por exemplo, controle automático é essencial em operações industriais para controle de pressão, temperatura, umidade, viscosidade e fluxo em processos industriais; manuseando, operando e montando partes mecânicas das indústrias de fabricação, entre muitas outras (Ogata. 2011).

Os avanços do controle automático propiciam meios para atingir-se desempenho ótimo de sistemas dinâmicos, bem como melhoria na qualidade e diminuição de custo de produção, aumento da taxa de produção, operações manuais repetitivas etc.

Segundo Valadão e Araújo (2012), o controle de processo industrial tem como objetivo geral alcançar o maior nível de produção possível, mantendo-se as especificações físicas e químicas dos produtos no mínimo valor de variabilidade, com o menor custo operacional.

De acordo com Kelly e Spottiswood (1990), o controle de cada processo individual de uma planta de processo é uma tarefa complexa. E controlar a operação como um todo eleva esta tarefa à extrema complexidade. Na indústria química, o controle automático já é utilizado há muitos anos, porém o controle em beneficiamento de minério é mais recente, devido à falta de instrumentação adequada para medir as variáveis de processo requeridas, ou não é robusto o suficiente para resistir às severas condições de trabalho existentes nas plantas.

Os controles de processos podem ser definidos como seqüencial ou contínuo. Os controles seqüenciais ocorrem onde um determinado tipo de controle inicia a partir do fim de outro controle.

Entretanto, os controles contínuos requerem análises contínuas e ajustes rápidos de variáveis de processos, de forma a sempre ter um monitoramento da qualidade do produto. O controle de processo do beneficiamento do minério de ferro se enquadra no segundo tipo de controle.

3.2. Tipos de Instrumentos Utilizados Para o Processo de Minérios de Ferro

Embora as empresas definam suas variáveis, estratégias de controle e qualidade do produto final, há elementos de controle que são comumente utilizados neste tipo de processo.

Os principais elementos de controle encontrados no beneficiamento do minério de ferro são os medidores e transmissores de nível, pressão e vazão.

Estas variáveis são de extrema importância no processo de beneficiamento do minério de ferro para que a qualidade do produto final seja garantida.

3.3. Sensores e Transmissores

Os sensores são os primeiros componentes na cadeia de medidas de grandezas físicas. Eles convertem variáveis físicas e químicas de um processo ou instalação em sinais elétricos que quase sempre em sinais analógicos. Somente um conhecimento completo das respostas dos sensores garante o sucesso; algumas vezes os sensores emitem sinais errados devido a interferências, condições de uso ou muitas vezes por causa do processo em si (Placko, 2007).

Considerando a controle de nível mostrado na Figura 3-1, o operador ajusta o nível do fluido no tanque apenas manipulando a válvula.

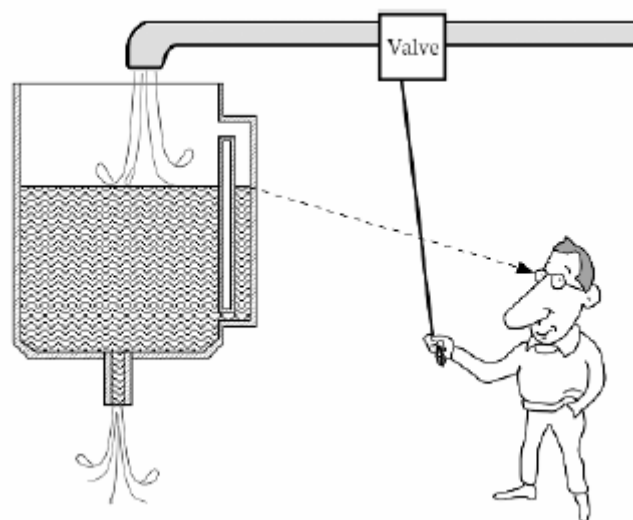


Figura 3-1: Controle de nível pelo operador

Qualquer variação de vazão ou distúrbios similares pode ser compensada pelo operador. Sem este tipo de controle o tanque poderia transbordar ou praticamente permanecer vazio.

Segundo Fraden (2004), um sensor é frequentemente definido como um dispositivo que recebe e responde a um sinal ou estímulo. Sendo que este estímulo é a quantidade, propriedade ou condição que é sentida e convertida em sinal elétrico.

Genericamente, pode-se dizer que um sensor é um conversor de um valor não elétrico em um sinal elétrico. Este sinal elétrico pode ser amplificado ou modificado por dispositivos eletrônicos, sendo gerado um valor, na grande maioria, de tensão ou corrente.

O termo sensor deve ser distinto do transdutor. O último é um conversor/amplificador de um tipo de energia em outra, enquanto a primeira converte algum tipo de energia em elétrica.

Os transmissores, em geral, são uma junção de um elemento transdutor e um circuito de transmissão de sinal, seja este sinal em tensão, corrente, frequência, rede ou outros.

3.4. Unidades de Medidas

Para especificar e executar cálculos envolvendo variedades físicas é necessário que sejam definidas a natureza e grandeza, ou amplitude, da variável física em questão. A medida padrão de cada tipo de grandeza física é a unidade; o número de vezes que a unidade comparece no valor total da grandeza define o número que é o resultado da medição (Helfrick e Cooper, 1994).

Para que toda variável seja controlada é necessário que as grandezas e suas unidades sejam conhecidas.

Segundo Bega (2003), desde 03 de maio de 1978, pelo decreto nº 81621, o sistema de unidades oficialmente adotado no Brasil é o Sistema Internacional de Unidades (SI).

Existem dois tipos de unidades de grandezas, as unidades fundamentais e as unidades derivadas. As unidades fundamentais são primárias para mecânica, eletricidade, calor e iluminação.

Através de sete unidades base, representadas na Tabela 3-1, pode-se obter, de forma direta ou indireta, as unidades derivadas.

Tabela 3-1: Unidades das grandezas básicas

GRANDEZA	UNIDADE	SÍMBOLO
Comprimento	Metro	m
Massa	Quilograma	kg
Tempo	Segundo	s
Corrente Elétrica	Ampere	A
Temperatura Termodinâmica	Kelvin	K
Quantidade de Matéria	Mol	mol
Intensidade Luminosa	Candela	cd

3.5. Medidores de Vazão

3.5.1 Base da Dinâmica de Vazão

De acordo com Fraden (2004), um dos fundamentos da física é que a massa possui uma quantidade conservada. Isto é, não pode ser criada ou destruída. Na ausência de fontes ou dissipadores de massa, a sua quantidade permanece constante, independentemente das fronteiras. No entanto, se não houver entrada ou saída de fluxo de massa através dos limites, a soma de entrada e saída de fluxo deve ser zero. Seja qual for a massa que chega, ela deve sair. Quando ambos são medidos durante o mesmo intervalo de tempo, a massa entrando no sistema é igual à massa saindo do sistema. Portanto,

$$\frac{dM_{in}}{dt} = \frac{dM_{out}}{dt} \quad (3.1)$$

A vazão é a quantidade de massa ou volume de determinado fluido que atravessa determinada seção de um conduto livre ou forçado por uma unidade de tempo. Sendo que um conduto livre pode ser rio ou tubulação e um conduto forçado pode ser uma tubulação com pressão positiva ou negativa, Figura 3-2.

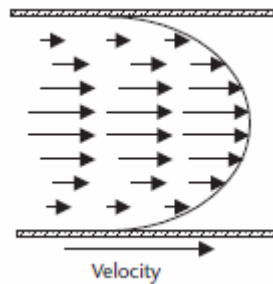


Figura 3-2: Variação de velocidade através da tubulação

Portanto, por definição, com a seguinte expressão é possível obter a vazão:

$$Q = \int_A v dA \quad (3.2)$$

Onde, v é a velocidade do fluido e A é a seção do conduto por onde o fluido está passando, Figura 3-3.

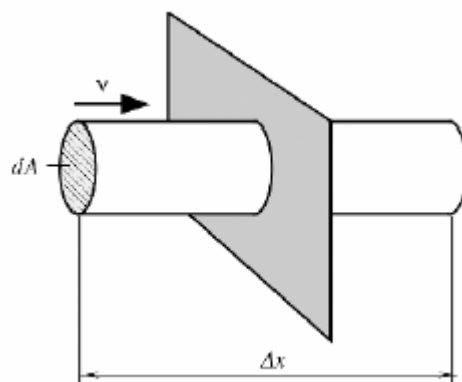


Figura 3-3: Vazão através de um plano

3.5.2 Instrumentos de Medição de Vazão

Segundo Dunn (2006), A precisão da medição do fluxo de fluidos é muito importante em várias aplicações industriais. O desempenho ideal destes processos requer taxas de vazão específicas. Os custos dos líquidos e gases são baseados na medição de vazão

através da tubulação, mostrando a necessidade, pelos fins contábeis, da precisão da medida e do controle do fluxo.

A vazão pode ser laminar, turbulenta ou uma combinação de ambas, Figura 3-4. Reynolds observou em 1880 que o padrão de vazão poderia ser previsto pela propriedade física do líquido. Se o número de Reynolds (R) para a vazão na tubulação for igual ou menor que 2000, a vazão é laminar. Caso o número de Reynolds esteja entre 2000 e aproximadamente 5000, indica que a vazão está em uma zona intermediária, podendo ser laminar, turbulento ou ambos. E acima de 5000, a vazão é sempre turbulenta.

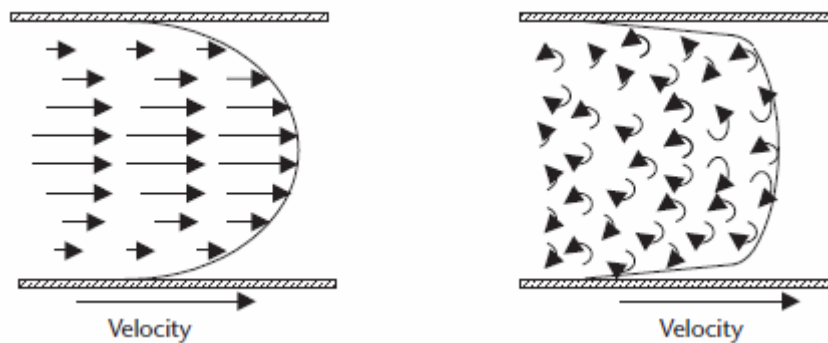


Figura 3-4: Vazão laminar e vazão turbulenta

O número de Reynolds é encontrado de acordo com a relação abaixo:

$$R = \frac{V \cdot D \cdot \rho}{\mu} \quad (3.3)$$

Onde V é a velocidade média do fluido, D é o diâmetro da tubulação, ρ é a densidade do fluido e μ é a viscosidade absoluta.

A medição de vazão pode ser dividida em grupos, vazão, fluxo total e vazão mássica. A escolha do tipo de dispositivo a ser utilizado depende do requisitado para a precisão, range e características do fluido, (isto é, gás, líquido, partículas em suspensão, temperatura, viscosidade, etc.) (Dunn, 2006).

A medição de vazão é extremamente importante no processo de beneficiamento de minério de ferro, porém é a variável mais difícil de ser medida com precisão, devido ao fato que os padrões não são simples, nem fáceis, e muito menos portáteis ou transportáveis.

3.5.2.1 Medição com Sondas

As sondas, de um modo geral, têm por objetivo determinar a velocidade nos centros dos tubos de correntes do escoamento delimitados pelas dimensões da seção transversal das sondas. Com estas velocidades, medidas em vários pontos de uma mesma seção transversal, para o escoamento em regime permanente e estacionário, torna-se possível determinar a velocidade média nesta seção transversal e, portanto a vazão.

Geralmente, para determinação do número mínimo de medidas ou de sondas a serem instaladas, por raio ($d/2$), em dois diâmetros normais, é recomendado:

* Fluido no estado gasoso

$$z_s = 3,5 \cdot A^{1/3}; \quad A = \frac{\pi \cdot D^2}{4}; \quad A \text{ (m}^2\text{);} \quad D \text{ (m)} \quad (3.4)$$

* Fluido no estado líquido

$$2,82 \cdot \sqrt{D} < z_s < 3,54 \cdot \sqrt{D} \quad (3.5)$$

Para determinar o posicionamento das sondas adota-se o critério da divisão de A em um número $2 \cdot z_s$ de áreas iguais, para os raios dos anéis:

$$r_{aj} = \frac{D}{2} \cdot \sqrt{\frac{j}{2 \cdot z_s}} \quad (3.6)$$

As sondas são dispostas ao longo dos dois diâmetros normais nos raios de j ímpares. Assim, a vazão será dada pela velocidade integralizada em toda a área da seção do tubo.

$$Q = \int_A v dA = \int_R v \cdot r dr \quad (3.7)$$

Existe uma grande quantidade de sondas mecânicas, iônicas e térmicas, dentre outras, muitas normalizadas, sendo as mais conhecidas denominadas: tubo de Pitot, tubos tipo o de Prandtl, sondas duplas e sonda Venturi.

Na Figura 3-5 estão representados os tubos de Pitot e o tubo de Prandtl.

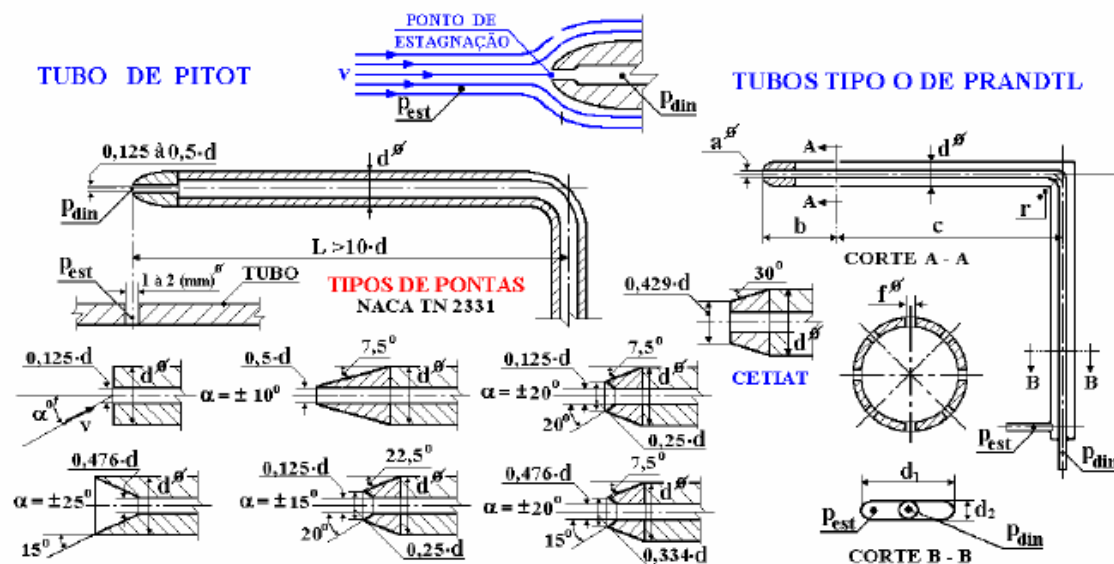


Figura 3-5: Tubo de Pitot e tubo de Prandtl

3.5.2.2 Medidor Vortex

Segundo Moris (2006), o medidor de vazão vortex é um instrumento relativamente novo, que possui um ganho rápido em popularidade e começa a ser usado como uma alternativa ao tradicional medidor de pressão diferencial, na maioria das aplicações.

Os medidores vortex utilizam o efeito dinâmico que consiste na geração de uma esteira de vórtices a jusante de um obstáculo mergulhado no escoamento, conhecido como

esteira de Von Karman, cujas características começaram a ser estabelecidas, em 1911, por Bernard Von Karman e que estão mostradas na Figura 3-6.

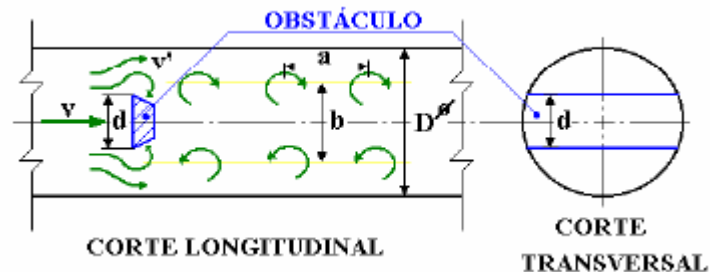


Figura 3-6: Esteira de Vórtices

A vazão é dada por:

$$Q = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot v = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot d \cdot f}{4 \cdot St} \quad (3.8)$$

Onde St é o número de Strouhal e f é a frequência de vórtices.

Os medidores vortex, em fase de serem normalizados, podem ser aplicados, em princípio, para qualquer vazão na faixa $Q_{\max} / Q_{\min} \leq 10$, com perda de carga 60% a 80% correspondente a placa de orifício, devendo ser instalados em trecho reto do conduto distante, a montante, mais de 15 D .

3.5.2.3 Medidor Ultrassom

O princípio de funcionamento dos medidores de vazão ultrassônicos é da propagação das ondas nos meios, no caso fluido em escoamento, com frequências compreendidas entre 150 kHz e 5 MHz.

Diferentes princípios físicos podem ser utilizados para medição de velocidades de escoamentos, os quais permitirão determinar a velocidade média e pelo princípio de

conservação da massa, a vazão. Dentre os princípios destacam-se o Doppler e o de Tempo de Trânsito.

Medidor ultrassom Doppler

Estes medidores se baseiam no princípio do mesmo nome, de reflexão de ondas acústicas que incidem nas partículas em suspensão no escoamento do fluido, Figura 3-7.

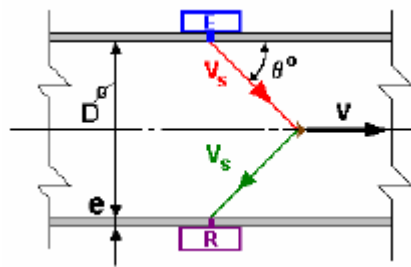


Figura 3-7: Reflexão de ondas no medidor Doppler

$$\Delta f = \frac{\bar{v} \cdot f_0 \cdot \cos \theta}{v_s}; \quad Q = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot v_s}{4 \cdot \cos \theta} \cdot \frac{\Delta f}{f_0} = k \cdot \Delta f \quad (3.9)$$

Onde:

- Δf (Hz) → diferença de frequência a ser medida;
- f_0 (Hz) → frequência de referência;
- θ (°) → ângulo da onda com a direção do escoamento;
- \bar{v} (m/s) → velocidade média do escoamento;
- v_s (m/s) → velocidade do som no meio fluido.

A principal limitação deste medidor está no fato do fluido em escoamento ter que conter um número limitado de partículas em suspensão, normalmente no intervalo $0 < n_p (\%V) \leq 1$. Caso este número seja maior, a faixa de ruídos aumenta ocasionando menor precisão na medida de frequência na onda refletida.

Medidor ultrassom por tempo de trânsito

Os medidores de vazão por tempo de trânsito se baseiam na medição dos tempos em que ondas acústicas emitidas simultaneamente no sentido do escoamento e contra a mesma, Figura 3-8. Estes medidores podem ter o sistema emissor/receptor localizado externamente ou internamente ao conduto, e são respectivamente denominados medidores de vazão ultrassônicos não-intrusivos e medidores de vazão ultrassônicos intrusivos. Estes últimos podem ser de faixa acústica estreita ou de faixa acústica larga.

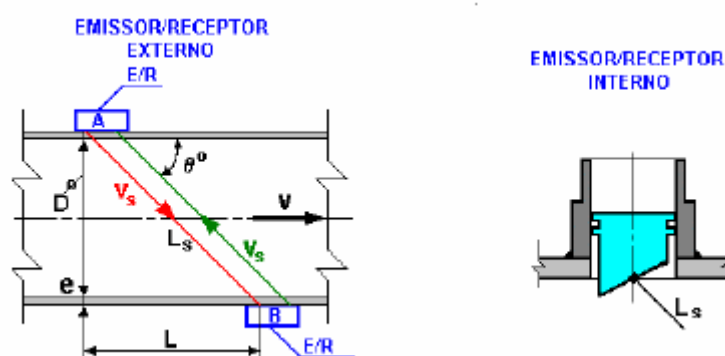


Figura 3-8: Reflexão de ondas no medidor por tempo de trânsito

A velocidade média do fluido será

$$v \cong \frac{\Delta T}{\bar{T}^2} \cdot \frac{L}{2 \cdot \cos \theta} \quad (3.10)$$

Onde \bar{T} e ΔT são o tempo médio e a diferença entre os tempos de trânsito em ambos os sentidos.

3.5.2.4 Medidor Eletromagnético

De acordo com Moris (2006), os medidores de vazão eletromagnéticos são limitados para obter o volume do material em fluidos eletricamente condutivos. O instrumento,

mostrado na Figura 3-9, consiste de um tubo em aço inoxidável, coberto com uma camada isolante, que entra em contato com o fluido a ser medido.

Geralmente, o material da cobertura de camada isolante é neoprene, politetrafluoretileno (PTFE) e poliuretano. Um campo magnético é criado no tubo ao posicionar pólos eletromagnéticos em lados opostos. Quando a quantidade de massa do fluido passa através do campo magnético, é gerada uma tensão induzida proporcional à vazão do material, e medida por dois eletrodos inseridos em lados opostos. Os eletrodos estão fixados geralmente fixados na superfície interna do cilindro.

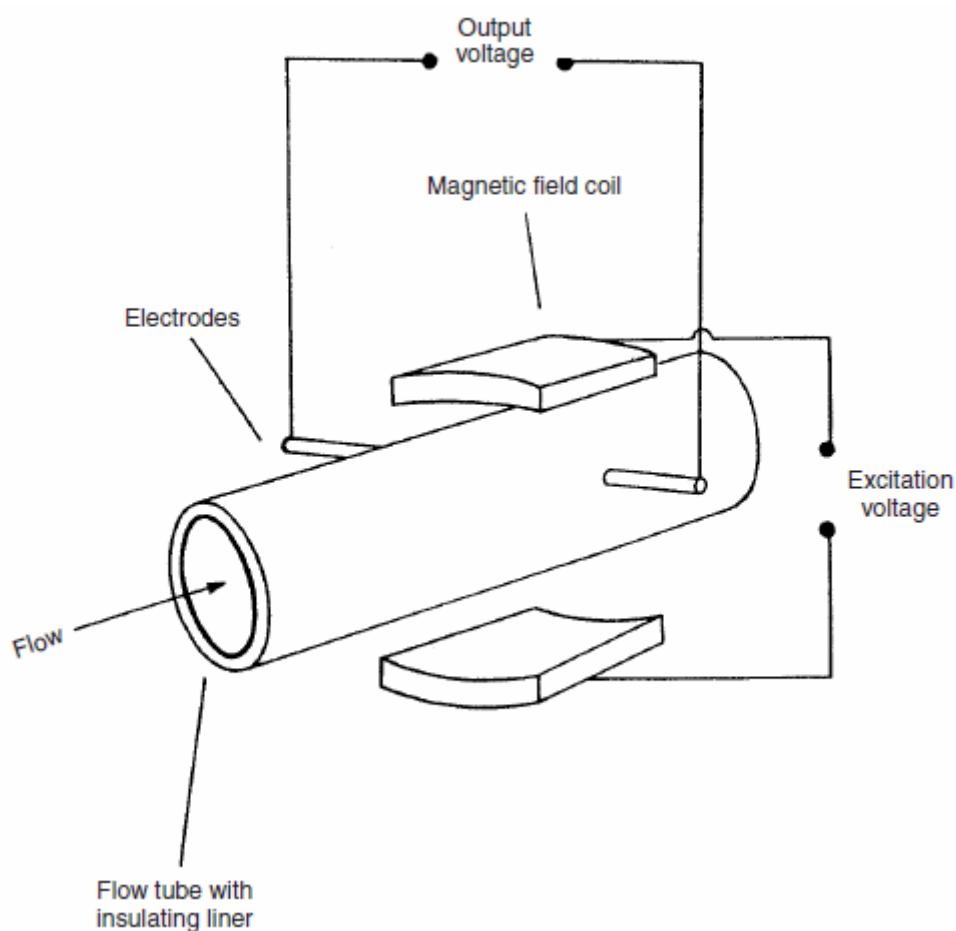


Figura 3-9: Medidor de vazão eletromagnético

Os medidores de vazão eletromagnéticos, Figura 3-10, se baseiam na lei de Faraday que para o caso de escoamentos pode ser assim anunciada: “Todo objeto condutor em movimento, no caso a água escoando em velocidade (v) no interior de um tubo de

diâmetro (D), dentro de um campo magnético de intensidade (B), dá origem a um campo elétrico de força eletromotriz (E)”, tal que:

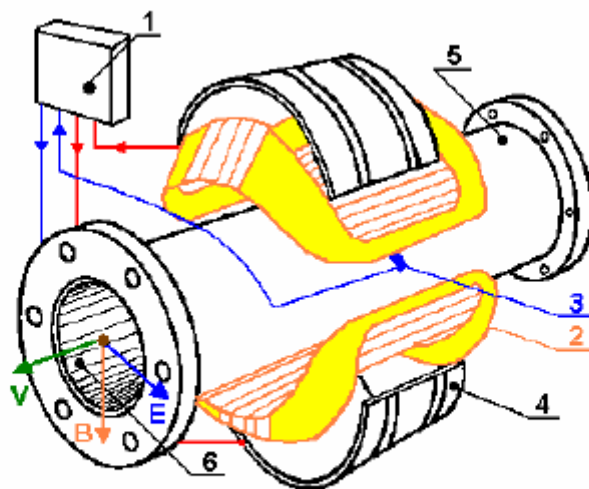
$$E = D \cdot v \cdot B \quad (3.11)$$

Considerando a velocidade média do escoamento resulta:

$$Q = \frac{\pi \cdot D}{4 \cdot B} \cdot E \quad (3.12)$$

Ou

$$Q = k \cdot E \quad (3.13)$$



1 - CONVERSOR/LEITOR. 2 - ENROLAMENTO PRINCIPAL. 3 - ELETRODOS PARA MEDIDA. 4 - CIRCUITO MAGNÉTICO. 5 - TUBO DE AÇO INOXIDÁVEL AMAGNÉTICO. 6 - ISOLANTE INTERNO TEFLON/POLIURETANO/NEOPRENE.

Figura 3-10: Detalhes do medidor de vazão eletromagnético

3.5.2.5 Medidor Laser

A medição de vazão a laser utiliza o princípio de conservação da massa, determinando a velocidade média do escoamento através do levantamento do campo de velocidades

locais. De acordo com a Figura 3-11, os dois feixes oriundos do laser em sua interferência no ponto de medida, geram as franjas de Fresnell, as quais distam entre si (e). Fazendo a medição do tempo (t) que uma partícula do fluido percorre a distância e, calcula-se a velocidade (v) do escoamento no ponto.

$$v = \frac{e}{t} = e \cdot f \quad (3.14)$$

Onde f é a frequência da onda luminosa a ser captada pelo receptor e posteriormente medida.

A distância entre as franjas pode ser determinada por:

$$e = \frac{\lambda_0}{2 \cdot i_r \cdot \text{sen}(0,5 \cdot \theta)} \quad (3.15)$$

Onde:

λ_0 → comprimento de onda da radiação;

i_r → índice de refração do fluido;

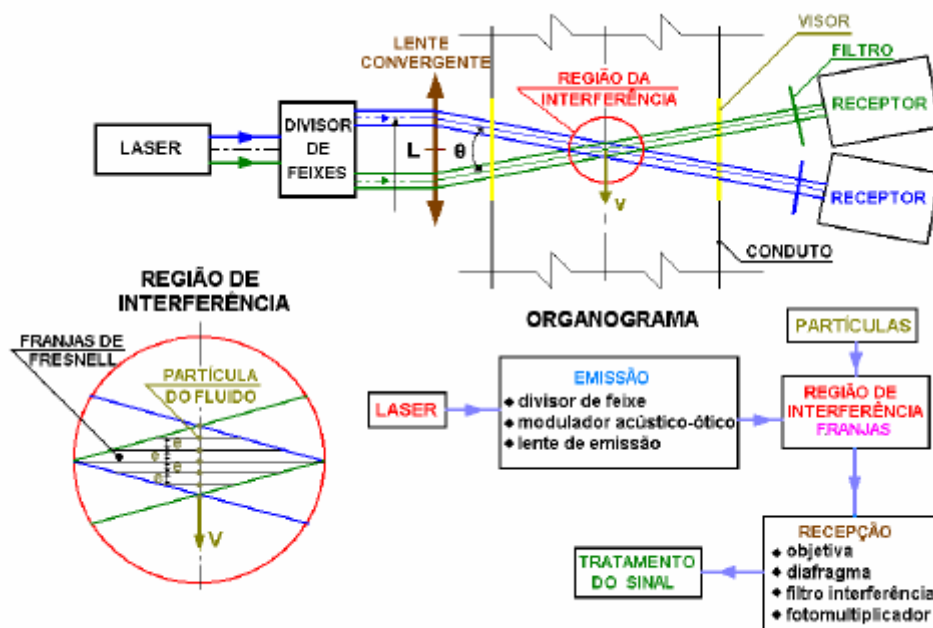


Figura 3-11: Organograma do Medidor de Vazão Laser

3.6. Medidores de Nível

3.6.1 Princípios

A medida variação de posição ou deslocamento de material é essencial para muitas aplicações: controle de processos realimentados, avaliação de desempenho, controle de tráfego, robótica, sistemas de segurança, etc.. Para posição, são indicadas as coordenadas do objeto de acordo com a referência. Entretanto o deslocamento de material indica o movimento de um ponto a outro de acordo com uma trajetória específica. Em outras palavras, o deslocamento é medido quando um objeto é referenciado a sua posição anterior, e não a outra referência (Frade, 2003).

3.6.2 Instrumentos de Medição de Nível

Segundo Dunn (2006), existem muitos métodos diferentes para a medição de nível e os sensores de nível podem ser divididos em quatro categorias diferentes:

- Diretos: onde o nível atual é monitorado;

- Indireto: onde outras propriedades do material são utilizadas, por exemplo, peso ou pressão.
- Medição pontual: onde é necessário apenas indicar se há ou não material em um nível específico;
- Sensor de nível de sólido com fluxo livre.

Existe uma série de técnicas de medição para sensores de nível do tipo direto, desde os mais simples, usando um visor de nível, Figura 3-12, até os instrumentos com tecnologias de última geração, como medidores ultrassônicos. O presente trabalho aborda alguns instrumentos que se enquadram nesta classificação.

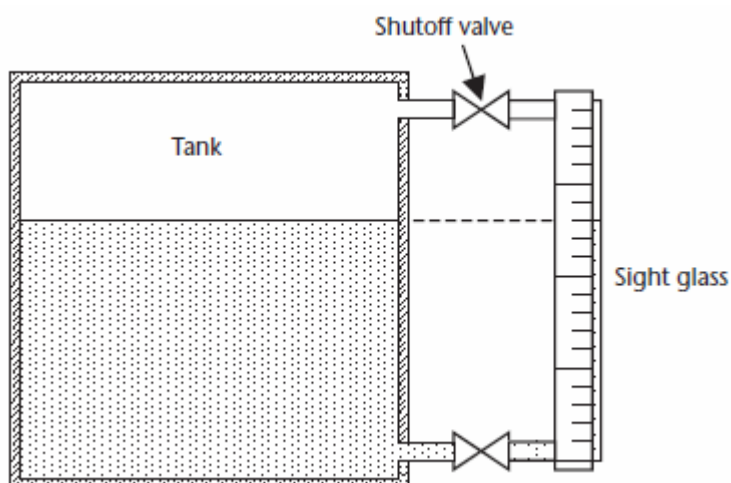


Figura 3-12: Visor de vidro para monitoramento do nível

Os cálculos de nível por métodos de medição indireta são comumente utilizados na indústria. Podem ser medidos através de pressões hidrostáticas, borbulhamento, células de carga, usados para obter o peso do material, ou outros métodos, Figura 3-13.

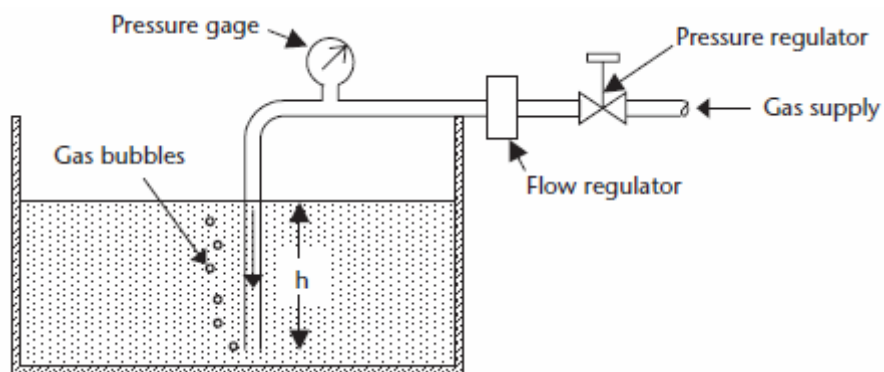


Figura 3-13: Medição de nível por borbulhamento

É utilizado para aplicações do tipo On/Off. Pode ser medida a partir de chaves de nível (do tipo boia, sonda, termal, etc.), Figura 3-14. Este tipo de instrumento não é objeto de estudo deste trabalho.

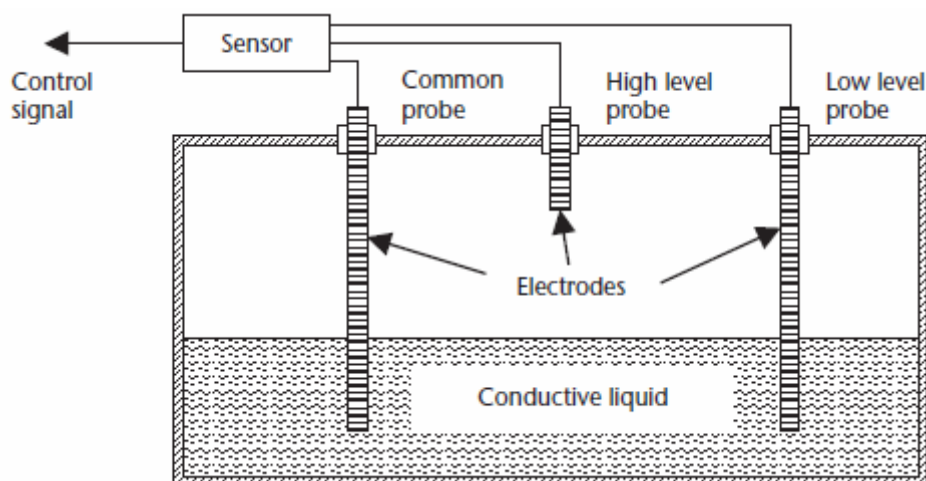


Figura 3-14: Montagem de chaves de nível em um tanque

Os sensores de nível de sólido com fluxo livre, Figura 3-15, são empregados em sistemas granulares com fluxo contínuo de material, por exemplo, cimento, grãos, minério, carvão, etc.. Porém não é muito utilizado no beneficiamento de minério de ferro, pois a detecção de material é realizada somente na região de instalação do sensor, não informando a quantidade real do silo. Este tipo de instrumento não é objeto de estudo deste trabalho.

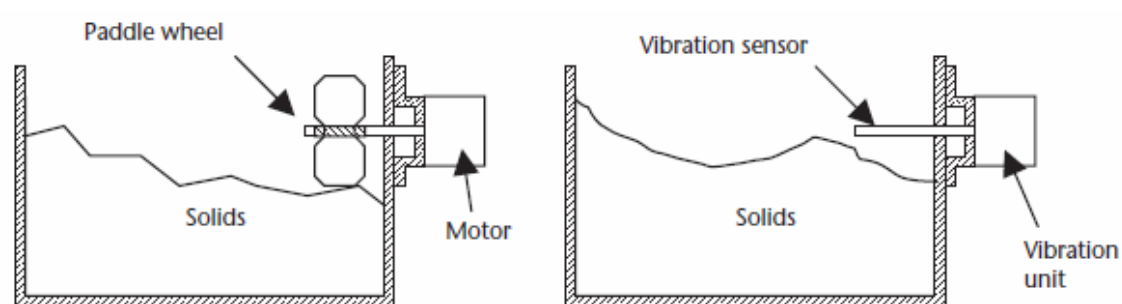


Figura 3-15: Sensores de nível de sólido com fluxo livre

3.6.2.1 Medidor por Pesagem

Um método utilizado para medição volumétrica ou quando os materiais são muito corrosivos ou de difícil aplicação dos métodos convencionais, consiste na medição contínua do peso do reservatório junto com o material.

O valor do peso pode ser relacionado ao nível quando são conhecidas a área ou seção transversal do reservatório e a densidade do material.

O peso é medido por balanças mecânicas convencionais ou por strain gauges, colocados estrategicamente nos elementos de suporte do reservatório, Figura 3-16.

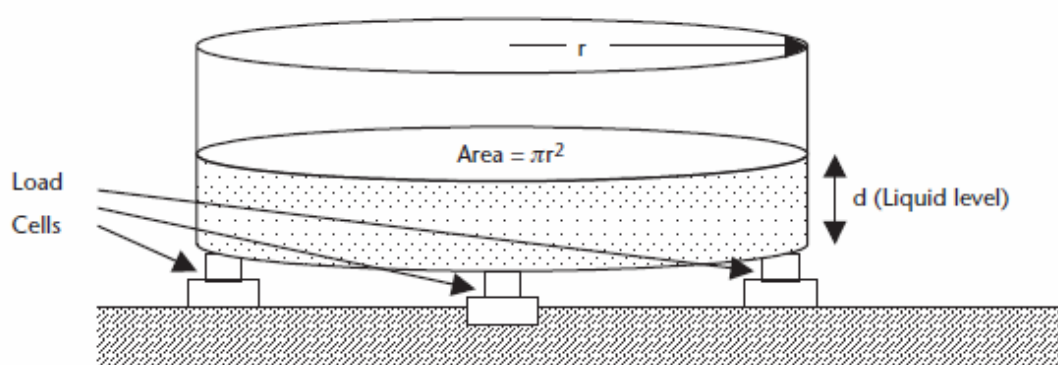


Figura 3-16: Montagem de células de cargas para medição de nível

3.6.2.2 Medidor por Pressão Hidrostática

A pressão hidrostática oriunda de um fluido é diretamente proporcional à sua profundidade e, conseqüentemente, do nível da sua superfície. Vários instrumentos que usam este princípio estão disponíveis e são largamente empregados em indústrias.

No caso de tanques abertos, ou ainda quando existem tampas providas de ventanas, o nível pode ser medido através de um medidor de pressão apropriado montado na parte inferior do tanque ou suspenso, como mostrado na Figura 3-17.

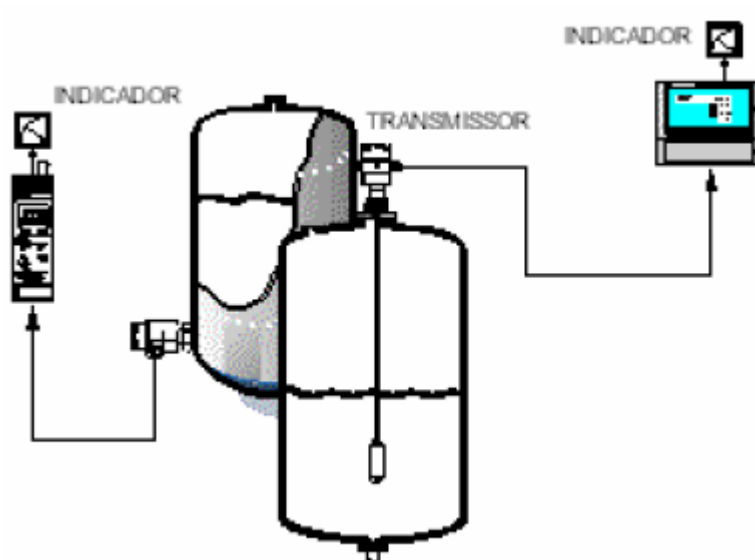


Figura 3-17: Transmissor/indicador de nível por pressão hidrostática

O nível do líquido, h , será relacionado com a pressão medida, P , através da seguinte expressão:

$$h = \frac{P}{\rho \cdot g} \quad (3.16)$$

Onde ρ é a densidade do fluido e g é a aceleração local da gravidade.

Quando o recipiente ou tanque é totalmente selado, Figura 3-18, o nível do fluido pode ser obtido através da pressão diferencial entre as partes inferior e superior do tanque.

Neste caso, o nível será relacionado à diferença de pressão, ΔP , segundo a seguinte relação:

$$h = \frac{\Delta P}{\rho \cdot g} \quad (3.17)$$

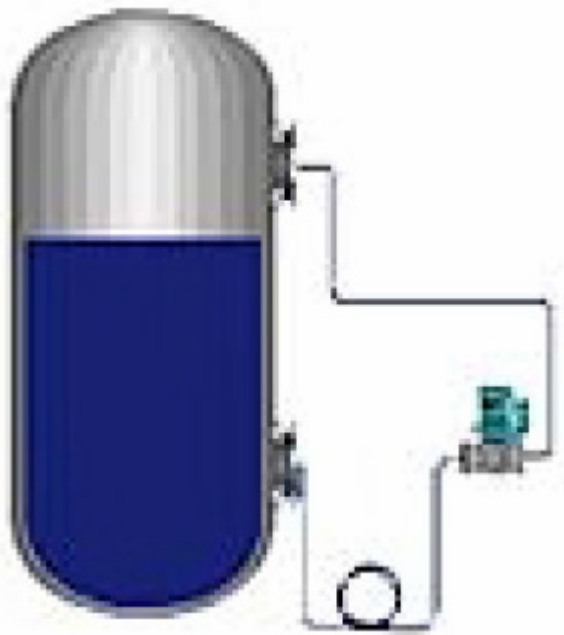


Figura 3-18: Medidor de nível por pressão diferencial em um tanque fechado

Ainda existe um sistema com borbulhador, que é uma variante da medição por pressão hidrostática e consiste em um tubo, com extremidade aberta, alimentado com ar comprimido. O ar comprimido irá escapar sob a forma de bolhas, permanecendo apenas a pressão equivalente à coluna de fluido. Esta pressão é obtida através de um transdutor ou manômetro calibrado em nível, sendo levada em consideração, a densidade do fluido. A Figura 3-19 ilustra o exposto.

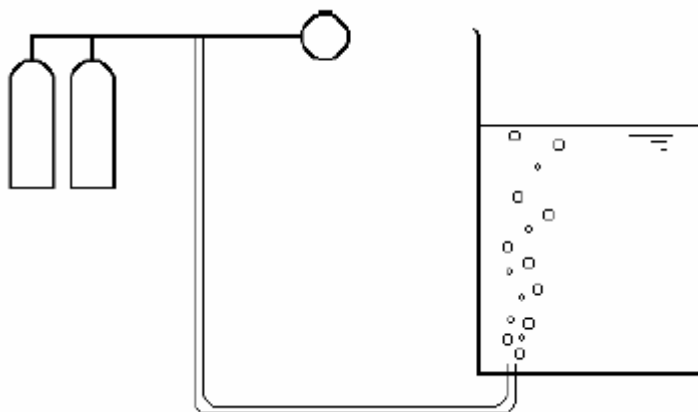


Figura 3-19: Sistema de medição de nível com borbulhador

3.6.2.3 Sensores Capacitivos

Os sensores capacitivos têm sido atualmente largamente empregados para a medição de nível em líquidos e sólidos na forma granular ou em pó, sendo bastante adequados para medições em condições extremas, tais como em metais líquidos (alta temperaturas), gases líquidos (baixas temperaturas), líquidos corrosivos (ácidos, etc.) e processos em alta pressão.

Duas versões destes medidores são usadas em função das características elétricas da substância em questão. Para substâncias não condutoras, ou seja, condutividade elétrica menor que 0,1, duas placas de metal em formato cilíndrico e concêntrico são imersas na substância, como apresentado na Figura 3-20. A substância se comporta como um dielétrico entre as placas à medida que se aprofunda na substância. Para placas cilíndricas concêntricas de raios a e b ($b > a$) e altura total L , a profundidade da substância, h , é relacionada à capacitância pela seguinte expressão.

$$h = \frac{C \cdot \ln(b/a) - 2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot (\epsilon - 1)} \quad (3.18)$$

Onde ϵ é a permissividade relativa da substância medida ($\epsilon > 2$) e ϵ_0 é a permissividade no vácuo. É importante ressaltar que a capacitância é medida por métodos apropriados.

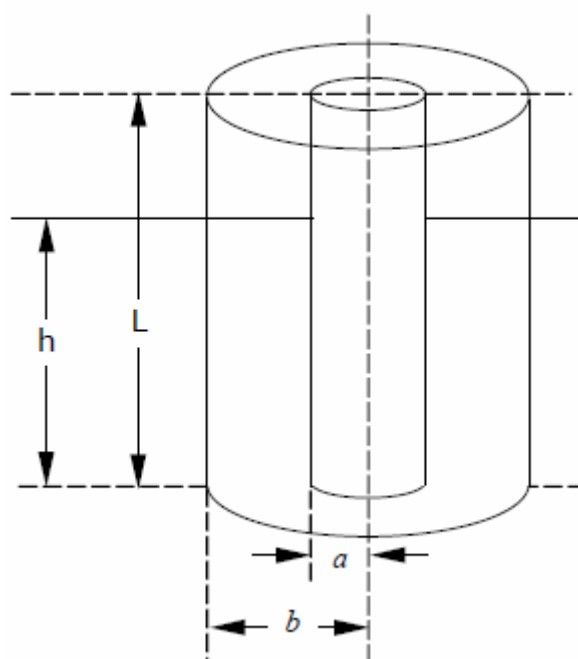


Figura 3-20: Placas cilíndricas concêntricas em um sensor capacitivo

No caso de substâncias condutoras, a mesma técnica é empregada, sendo a única diferença o revestimento das placas do capacitor por um material isolante. A relação entre C e h na expressão anterior deve, desta forma, ser modificada a fim de considerar o efeito dielétrico do isolante.

Os sensores capacitivos encontram as mais variadas aplicações, contudo, pode vir a ser impreciso se a substância a ser medida for contaminada com outros agentes que venham a modificar a sua constante dielétrica.

3.6.2.4 Sensores Condutivos

Este tipo de sensor é particularmente aplicável à medição de nível em fluidos condutivos, não corrosivos e sem partículas em suspensão.

A sonda é formada por dois eletrodos cilíndricos, exceto quando a parede do reservatório for metálica, neste caso aplica-se somente um eletrodo. Para este sistema,

deve ser considerada uma tensão alimentação de aproximadamente 10 Vca, a fim de evitar a polarização dos eletrodos.

Em medições contínuas, a sonda é colocada verticalmente e é tão profunda quanto se deseja monitorar. A corrente elétrica circulante é proporcional à parcela do eletrodo imersa no fluido condutivo.

Em aplicações de medições pontuais, operação como chave e detecção de nível, posiciona-se a sonda horizontalmente em relação à superfície do fluido, resultando em uma corrente elétrica de amplitude constante e estável, tão logo o nível atinja a sonda.

3.6.2.5 Sensores Ultrassônicos

O sistema de medição de nível por ultrassom é baseado no princípio de que a energia sonora de uma fonte ultrassônica emitida sobre uma superfície é refletida a partir desta para um detector.

Sendo assim, pode-se inferir sobre o nível de sólidos ou líquidos, medindo-se o tempo de trânsito que a onda gasta desde a sua emissão até a sua recepção. Neste caso deve ser tomado um cuidado especial em se considerar a variação da velocidade do som no ar em função da temperatura, cuja sensibilidade é da ordem de $0,607\text{m/s}/^\circ\text{C}$.

A Figura 3-21 apresenta esquemas de instalação em campo e medição de nível de diversos elementos.

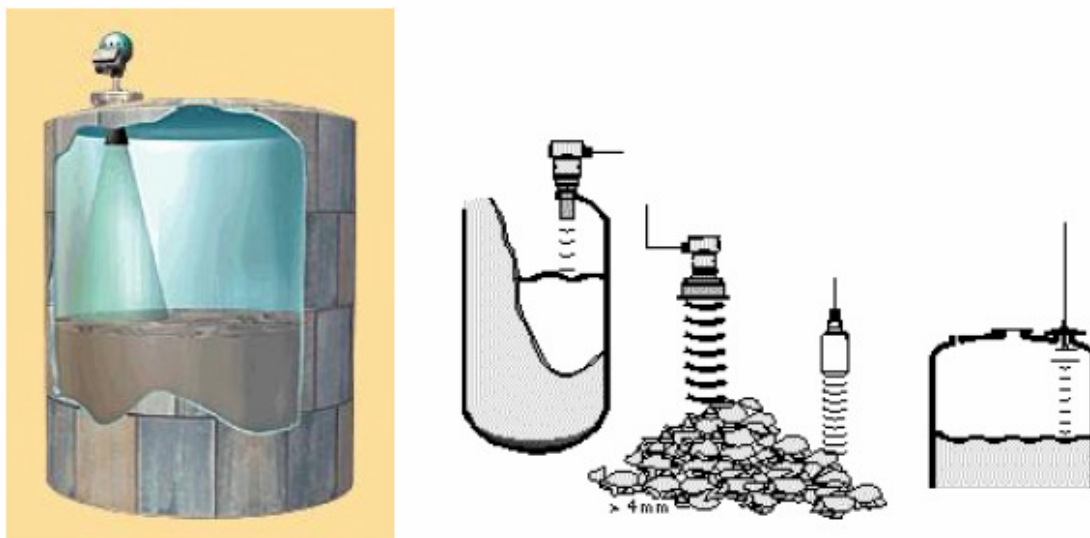


Figura 3-21: Montagem de Sensores Ultrassônicos

Em sistemas alternativos, a fonte ultrassônica é colocada no fundo do tanque e o tempo de trânsito entre a emissão, a reflexão da superfície do líquido e o retorno é medida. Tal técnica é particularmente interessante quando se deseja determinar a interface (transição) entre líquidos imiscíveis ou líquidos/precipitados.

3.6.2.6 Medição por Radar

Os medidores do tipo radar emitem ondas eletromagnéticas curtas e que se propagam na mesma velocidade da luz. O sinal emitido pela antena é refletido ao incidir, perpendicularmente, sobre a superfície de um líquido ou sólido com constante dielétrica diferente do meio gasoso (geralmente ar) existente acima do produto. O sinal refletido é captado pela própria antena emissora e é utilizado para medição do nível do líquido ou sólido. A Figura 3-22 ilustra este método.

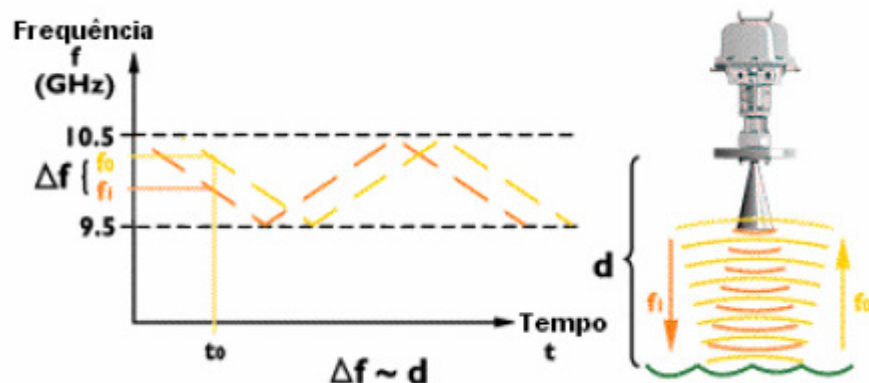


Figura 3-22: Faixa de medição de frequência no medidor de nível tipo radar

Os dispositivos do tipo radar podem ser utilizados para medição de nível de líquidos (hidrocarbonetos, asfalto, GLP, produtos químicos, polpa etc.) e alguns tipos de sólidos (minérios em grãos e carvão). Podem ser utilizados na medição de nível em tanques de teto fixo e teto flutuante, cilindros, esferas de GLP e silos de minério e carvão, como pressões até 25 bar e temperatura de até 205 °C (Bega, 2003).

3.7. Medidores de Pressão

3.7.1 Conceitos de Pressão

O conceito de pressão foi primeiramente baseado no trabalho pioneiro de *Evangelista Torricelli*, que, por um curto tempo, foi aluno de *Galileu*. E durante seus experimentos com mercúrio, em 1643, ele provou que a atmosfera exerce pressão sobre a terra (Frade, 2003). A partir deste experimento, Pascal percebeu que a altura da coluna de mercúrio se alterava de acordo com a altitude.

Após inúmeras pesquisas, a pressão é, por definição, a relação entre a força normal exercida em uma superfície e a área desta superfície, segundo a seguinte expressão:

$$P = \frac{F}{A} \quad (3.19)$$

A pressão pode ser referenciada de duas formas:

Quando a referência é o zero absoluto, a pressão é denominada absoluta, como na Figura 3-23.

Onde se utiliza a pressão atmosférica como referência, as pressões medidas a partir desta referência (acima desta referência) são chamadas pressões relativas, pressões manométricas (gauge pressures), pressões efetivas ou pressões positivas. As pressões abaixo dessa referência são chamadas de vácuo ou pressões negativas. O vácuo é simplesmente uma redução da pressão atmosférica (Bega, 2003).

De maneira geral pode-se dizer que:

$$\text{Pressão Absoluta} = \text{Pressão Relativa} + \text{Pressão Atmosférica} \quad (3.20)$$

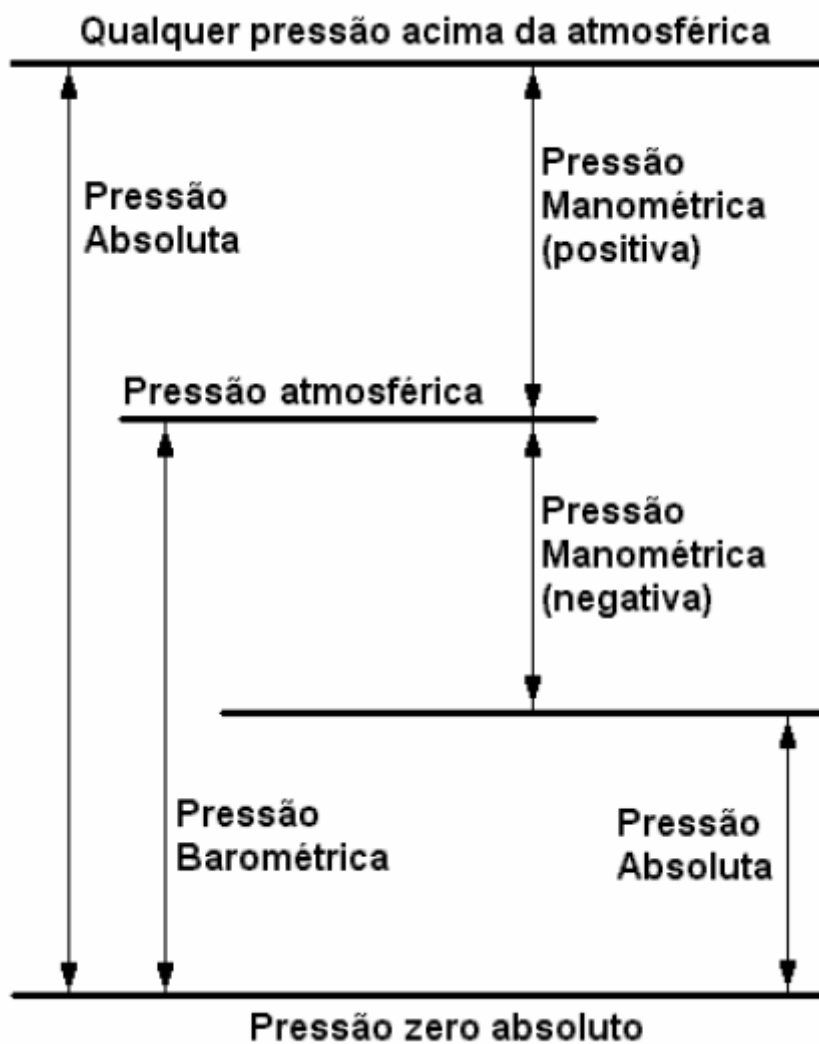


Figura 3-23: Relações de pressão

A pressão é uma das grandezas físicas que mais possuem unidades de medida empregadas para representá-la. As relações entre as principais se encontram a seguir:

$$\begin{aligned}
 1 \text{ atm} &= 1,03323 \text{ kgf/cm}^2 = 101325 \text{ Pa} = 10,33 \text{ mmH}_2\text{O} & (3.21) \\
 &= 760 \text{ mmHg} = 1,01325 \text{ bar} = 14,70 \text{ psi}
 \end{aligned}$$

É importante observar que na indústria, quando se omite a referência, fica implícito que a pressão é atmosférica e como a definição da pressão é um conceito de força, muitos medidores e transdutores partem da medição de força sobre um elemento de determinada área.

3.7.2 Instrumentos de Medição de Pressão

Muitos instrumentos são aptos para medir a pressão, estes instrumentos podem ser divididos em dispositivos de medidas de pressão e dispositivos de medidas de vácuo. Tubos em U, Figura 3-24, são substituídos por instrumentos menores e mais robustos, como o diafragma de silicone. Já os dispositivos de medição a vácuo, requerem uma técnica especial (Dunn, 2006).

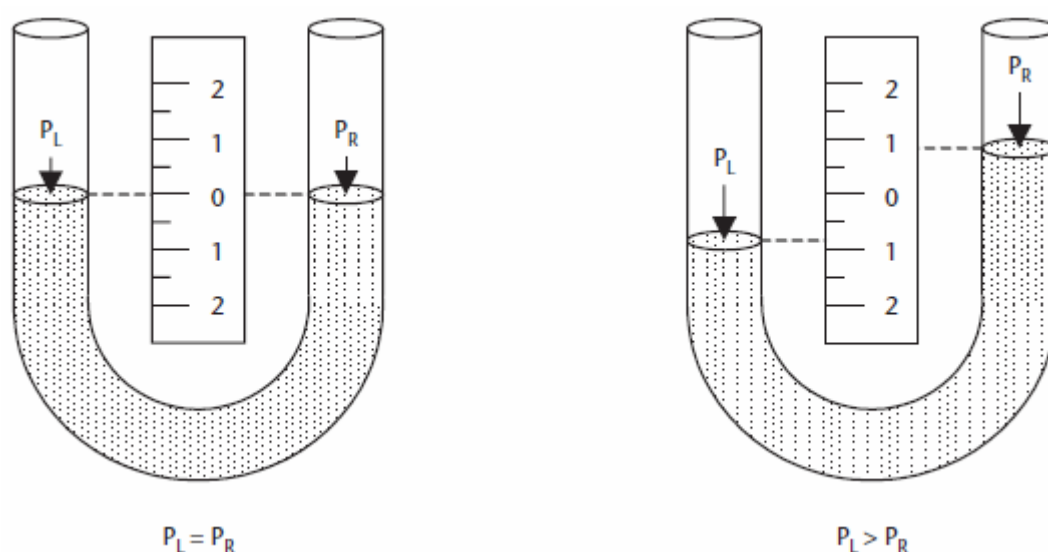


Figura 3-24: Tubos em U sem dif. de pressão (a) e com o lado eq. pressurizado (b)

Os tipos de sensores mais comuns no beneficiamento de minério de ferro são do tipo capacitivo e piezoresistivos.

3.7.2.1 Sensores do Tipo Capacitivo

Os sensores capacitivos, indicados nas Figuras 3-25 e 3-26, são encontrados em configurações típicas, normalmente em um encapsulamento compacto contendo duas superfícies metálicas paralelas e eletricamente isoladas, uma das quais sendo um diafragma capaz de fletir a uma dada pressão aplicada.

O diafragma deve ser construído com material de baixa histerese ou ligas de vidro e cerâmica. Estas duas superfícies, que se comportam como as placas do capacitor, são

montadas de modo que a uma pequena flexão mecânica, causada pela aplicação de uma força, altere o espaço entre elas criando o efeito de um capacitor variável.

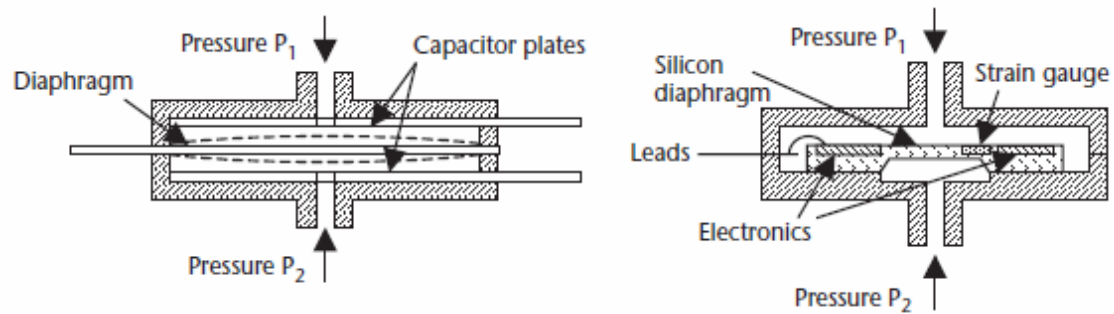


Figura 3-25: Sensor de pressão tipo capacitivo

A alteração da capacitância deve ser detectada por um circuito comparador bastante sensível e amplificado para sinais proporcionais de alto nível.

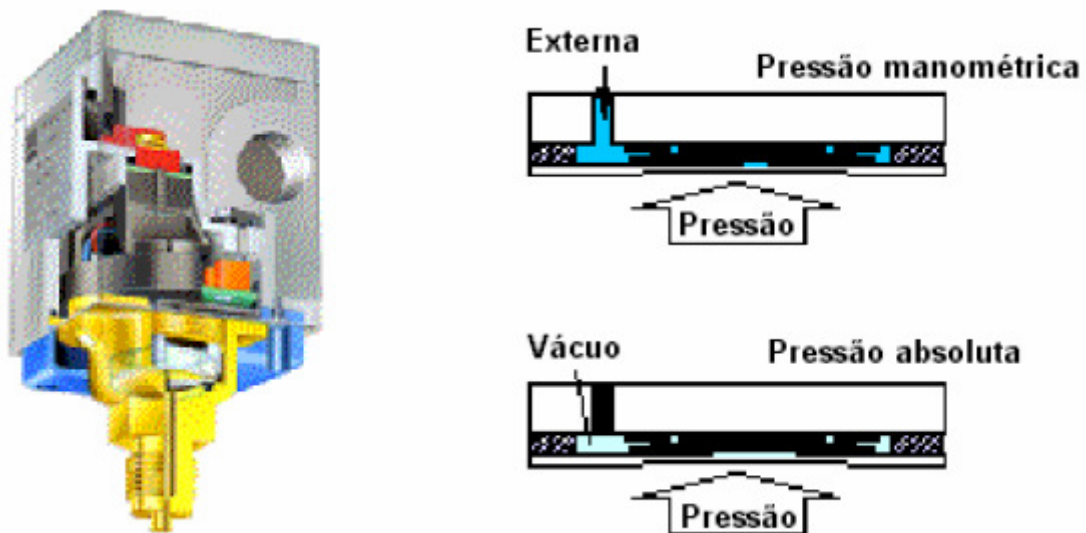


Figura 3-26: Ilustração em 3D do sensor de pressão tipo capacitivo

Sabe-se que a capacitância de um capacitor de placas planas e paralelas pode ser expressa em função da área (A) da placa e da distância (d) que as separa como:

$$C = \varepsilon \cdot \frac{A}{d} \quad (3.22)$$

Onde ε é a constante dielétrica do meio existente entre as placas do capacitor.

Se for considerado que pelo menos uma das placas esteja fixa e que outra sofra deflexão em função da pressão submetida, resulta em uma variação da distância entre as placas e, em última análise, da capacitância do elemento.

Sendo assim, ao submeter este sensor a uma fonte de corrente alternada, pode-se detectar a variação da pressão como uma função da variação da capacitância do sensor.

3.7.2.2 Sensores Piezoresistivos

De acordo com Frade (2003), para se fazer um sensor de pressão piezoresistivo (*strain gauges*), dois componentes são requeridos. Estes componentes são uma placa (eletrodos) de área conhecida (A) e um detector que responde a força (F) aplicada. Ambos componentes podem ser fabricados de silício.

Estes sensores são fabricados usando técnicas de processamento do silício, comuns na indústria de semicondutores. Por esta razão, grande parte da tecnologia dos semicondutores é empregada em sua fabricação.

Estes sensores são também frequentemente denominados sensores integrados, sensores de estado sólido, sensores monolíticos (formados por um único cristal de silício) ou, simplesmente, sensores de silício.

A Figura 3-27 mostra um sensor e seus componentes.

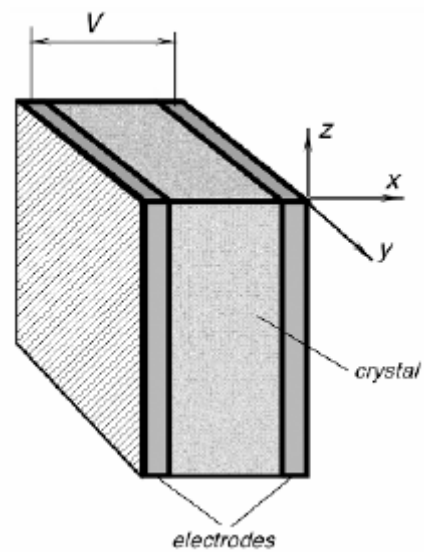


Figura 3-27: Eletrodos e cristal de silício do sensor piezoresistivo

Para este tipo de sensor, parte-se do princípio da deformação de uma estrutura quando sujeita a uma força.

Na Figura 3-28 tem-se uma estrutura livre de forças externas, sofrendo tração e compressão, respectivamente. A pressão descreve a intensidade da força em uma estrutura por unidade de área ($P = F/A$), enquanto a tensão descreve a deformação como a variação fracional no comprimento ($\Delta L/L$). Se o volume da estrutura for considerado constante, a variação da resistência em função de uma variação no comprimento é dada por:

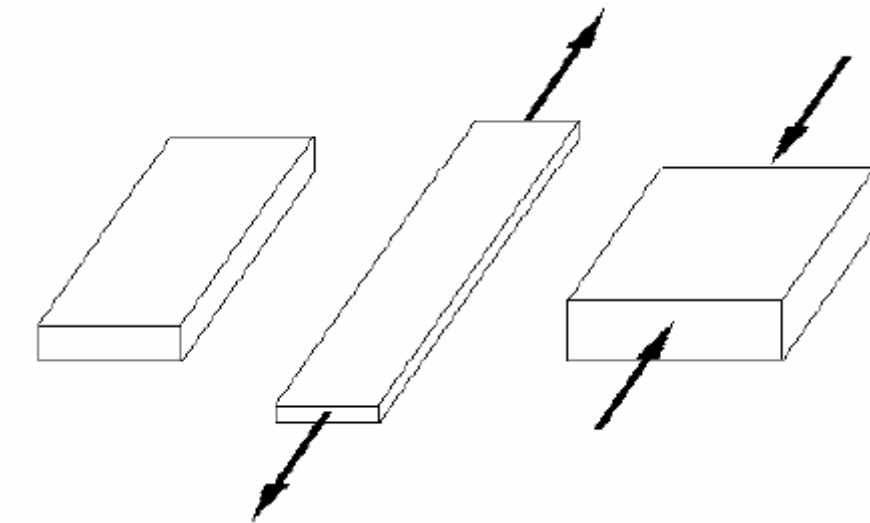


Figura 3-28: Princípios de deformação a partir de uma força externa

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{2 \cdot \Delta L}{L} \quad (3.23)$$

Sendo assim, a pressão a qual uma estrutura está sujeita poderá ser determinada pela variação da resistência de um sensor. Na maioria dos sensores, quatro resistores são integrados formando uma ponte de Wheatstone, de modo que dois resistores aumentam e dois diminuem suas respectivas resistências conforme o acréscimo ou decréscimo da pressão aplicada. A Figura 3-29 apresenta uma configuração de resistor integrado.



Figura 3-29: Configuração de um resistor integrado

4. RESULTADOS OBTIDOS: MAPAS COMPARATIVOS

É importante salientar que as características do processo podem ser atendidas completamente por determinado instrumento, porém este instrumento pode não oferecer um bom desempenho quando em operação. Assim, fica a cargo da engenharia de projeto e do cliente final a escolha dos tipos de instrumentos utilizados.

4.1. Vazão

Para aplicação de medição contínua de vazão de polpa de minério e líquidos corrosivos condutivos, é indicada a utilização de medidores magnéticos de vazão.

Estes instrumentos oferecem uma larga precisão, boa repetibilidade, não causam perdas de carga nas linhas de processo e são insensíveis às variações de temperatura, pressão e viscosidade.

Para medição de água em tubulações de grandes diâmetros e onde não seja requerida uma alta precisão, podem ser utilizados medidores magnéticos de vazão tipo “inseridos”, possuindo dispositivos para instalação em linhas pressurizadas, e possibilitando sua retirada sem parada do processo.

Para medição de gases em tubulações de grande diâmetro, deve ser utilizado tubo de Pitot com transmissores de pressão diferencial (Medição com Sondas).

Para medição de ar comprimido em tubulações até 2” serão utilizados medidores tipo vortex.

Para medição contínua da vazão de sólidos serão utilizados sistemas de pesagem dinâmica em correias transportadoras utilizando tecnologia de células de carga com “strain gauge”, com compensação automática da velocidade da correia.

O mapa comparativo de medidores de vazão é indicado na Tabela 4.1.

Tabela 4-1: Mapa comparativo de medidores de vazão

INSTRUMENTO	APLICAÇÃO		INSTRUMENTO	ALTERNATIVO	
TRANSMISSORES	FLUIDOS LÍQUIDOS LIMPOS	DIREÇÃO DE FLUXO	QUALQUER DIREÇÃO, DESDE QUE GARANTIDO TUBO CHEIO	ELETROMAGNÉTICO	ELETROMAGNÉTICO DE INSERÇÃO; SONAR; VORTEX
	POLPA		ELETROMAGNÉTICO	SONAR	
	FLUIDOS GASOSOS LIMPOS	DIREÇÃO DE FLUXO	QUALQUER DIREÇÃO	VORTEX / TUBO DE PITOT	PLACA DE ORIFÍCIO C/ TRANSMISSOR DE PRESSÃO DIFERENCIAL
	VAPOR			PLACA DE ORIFÍCIO C/ TRANSMISSOR DE PRESSÃO DIFERENCIAL	
	POLPAS E EFLUENTES EM CANALETA ABERTA			ULTRASSOM	
	SÓLIDOS		QUALQUER DIREÇÃO	CÉLULAS DE CARGA	

4.2. Nível

Para a aplicação de medição contínua de nível de sólidos em silos, líquidos em geral e polpa de minério em tanques serão utilizados medidores de nível do tipo ultra-sônicos.

Esta tecnologia já é consagrada no mercado e possui excelente desempenho na maioria das aplicações, pois não necessita de contato direto com o fluido de processo, sendo aplicável para grande maioria; é insensível às variações de densidade, que são bastante comuns nesta aplicação.

Não implica dizer que os outros métodos de medição de nível não se aplicam a contínua de nível de sólidos em silos, líquidos em geral e polpa de minério em tanques, por exemplo, para a medição em um silo metálico é recomendada a medição de nível por pesagem ou por ultra-som.

Existe ainda uma aplicação específica nos espessadores, a medição de nível por interface de polpa e lama. Esta medição é feita pelo medidor de nível por borbulhador.

Já para aplicação de medição em silos com alto grau de poeira será utilizado sistema por microondas ou radar, pois possuem maior potência no sinal para vencer as interferências dos sólidos em suspensão.

O mapa comparativo de medidores de nível é indicado na Tabela 4.2.

Tabela 4-2: Mapa comparativo de medidores de nível

INSTRUMENTO	APLICAÇÃO		INSTRUMENTO	ALTERNATIVA	
TRANSMISSORES	LÍQUIDOS E/OU POLPA	FÍSICA E QUIMICAMENTE NÃO AGRESSIVOS	REPRESAS E GRANDES RESERVATÓRIOS S/ TURBULÊNCIA	RADAR	ULTRA-SOM
			TANQUES E CAIXAS NÃO PRESSURIZADOS C/ TURBULÊNCIA	ULTRA-SOM	RADAR
			VASOS PRESSURIZADOS	PRESSÃO DIFERENCIAL	RADAR
			BACIA DO FILTRO A DISCO	LASER	
			INTERFACE (POLPA E LAMA)	BORBULHADOR	
	LÍQUIDOS E/OU POLPA	FÍSICA E/OU QUIMICAMENTE AGRESSIVOS / IMPREGNANTES	REPRESAS E GRANDES RESERVATÓRIOS S/ TURBULÊNCIA	RADAR	ULTRA-SOM
			TANQUES E CAIXAS NÃO PRESSURIZADOS C/ TURBULÊNCIA		
			VASOS PRESSURIZADOS	PRESSÃO DIFERENCIAL	RADAR
	COMBUSTÍVEIS	NÃO VISCOSOS	TANQUES NÃO PRESSURIZADOS	RADAR	PRESSÃO DIFERENCIAL
		VISCOSOS			
	SÓLIDOS	PILHA		RADAR	ULTRA-SOM
		SILOS METÁLICOS		PESAGEM / ULTRA-SOM	RADAR
		SILOS DE CONCRETO		RADAR	
		MOEGAS (MATAÇOS)		RADAR,	ULTRA-SOM
		CALHA ALIMENTAÇÃO		RADIOATIVO	

4.3. Pressão

Para medição contínua devem ser utilizados transmissores de pressão tipo diafragma utilizando tecnologia "strain-gauge" ou por célula capacitiva, microprocessado.

Estas tecnologias já são bastante consolidadas no mercado, atendendo à grande maioria das aplicações; e dentro de uma faixa ampla de pressões.

O mapa comparativo de medidores de pressão é indicado na Tabela 4.3.

Tabela 4-3: Mapa comparativo de medidores de pressão

INSTRUMENTO		APLICAÇÃO		INSTRUMENTO	ALTERNATIVO	
TRANSMISSORES	PRESSÃO ABSOLUTA, RELATIVA OU DIFERENCIAL	FLUIDOS	LÍQUIDOS E GASES LIMPOS	BAIXAS E MÉDIAS PRESSÕES	TRANSMISSOR TIPO CÉLULA CAPACITIVA	TRANSMISSOR TIPO PIEZO-ELÉTRICO
			ALTAS PRESSÕES			
		LÍQUIDOS E GASES FÍSICA OU QUIMICAMENTE AGRESSIVOS, OU IMPREGNANTES, OU VISCOSOS	BAIXAS E MÉDIAS PRESSÕES	TRANSMISSOR TIPO CÉLULA CAPACITIVA	TRANSMISSOR TIPO PIEZO-ELÉTRICO	
			ALTAS PRESSÕES			
		VAPOR	BAIXAS E MÉDIAS PRESSÕES	TRANSMISSOR TIPO CÉLULA CAPACITIVA	TRANSMISSOR TIPO PIEZO-ELÉTRICO	

5. CONCLUSÃO

De acordo com a literatura consultada e com experiência de profissionais em projeto, operação e manutenção, foram desenvolvidos e apresentados no Capítulo 4 os mapas comparativos de vazão, nível e pressão.

Os mapas comparativos desenvolvidos no presente trabalho servem como orientação ao usuário permitindo a seleção dos melhores instrumentos de medição para cada aplicação. Dessa forma ele contribui para a redução dos erros de medição relacionados com a instrumentação. Como já explicitados neste trabalho, esses mapas podem ser úteis em trabalhos relacionados ao desenvolvimento de projetos na área do beneficiamento de minério de ferro.

6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Além dos instrumentos abordados neste trabalho, é de grande valor um estudo e a elaboração de mapas comparativos dos tipos de válvulas e elementos de controle, não abordados neste trabalho, utilizados no processo de beneficiamento de minério de ferro.

Comumente, os tipos de válvulas utilizadas são: globo, esfera e borboleta. Porém existem características, como densidade e viscosidade, que indicam a utilização de determinado tipo de válvula.

Os elementos de controle não abordados são: medidor de densidade, analisador de granulometria, analisador químico, medidores de temperatura, medidor de torque, medidor de velocidade, medidor de pH e medidor de turbidez.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AALST, W.M.P. Process Mining: Discovery, Conformance and Enhancement of Business Processes. Schleiden, Germany: Springer, 2010. 352p.

BEGA, E.A. Instrumentação Industrial. 1 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 541p.

DUNN, W.C. Introduction to Instrumentation, Sensors, and Process Control. Boston/Londres: Artech House, 2006. 331p.

FRADEN, J. Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs and Applications. 3 ed. San Diego: Springer, 2004. 589p.

HELFRICK, A.D.; COOPER, W.D. Instrumentação Eletrônica Moderna e Técnicas de Medição. Tradução de MOREIRA, A.C.I. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1994. 234p.

KELLY, E.G.; SPOTTISWOOD, D.J. Introducción al Processamiento de Minerales. Versión Española. Cidade do México: Limusa, 1990. 526p.

MORIS, A.S. Measurement & Instrumentation Principles. 3 ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. 512 p.

OGATA, K. Engenharia de Controle Moderno. 5 ed. São Paulo: Pearson Education, 2011. 929p.

PLACKO, D. Fundamentals of Instrumentation and Measurement. 2 ed. Londres: ISTE Ltd, 2007. 532p.

VALADÃO, G.E.S; ARAÚJO, A.C. Introdução ao Tratamento de Minérios. 1ª Reimpressão, Belo Horizonte: Editora UFMG, 2012. 234p.