

MEDIÇÃO DE DENSIDADE DE POLPA DE MINÉRIO DE FERRO USANDO SENSOR DE PRESSÃO DIFERENCIAL¹

*Sidney Antonio Araujo Viana*²

Resumo

Este artigo descreve a implantação de um sistema de medição de densidade de líquidos, com princípio de funcionamento baseado na Equação de Bernoulli para fluidos incompressíveis. Essa equação relaciona a densidade de um líquido com a pressão diferencial de uma coluna fixa do mesmo, tal que medindo-se a pressão pode-se calcular a densidade. O sistema foi concebido para atender à necessidade de medição contínua de densidade de polpa de minério (overflow) dos classificadores espirais da Usina de Minério de Ferro de Carajás, pertencente à Companhia Vale do Rio Doce – CVRD. O equipamento de medição utilizado foi um transmissor de pressão (PIT) diferencial com diafragmas remotos flangeados, acoplados a um duto de drenagem (amostragem) de polpa. O transmissor envia as medições de pressão para o Controlador Lógico Programável (PLC) da planta, que então calcula a densidade em tempo-real. O artigo é organizado na seguinte sequência: inicialmente é resumido o funcionamento de um classificador espiral e são abordados alguns aspectos relevantes da densidade da água, pressão hidrostática e pressão hidrodinâmica em um líquido. Em seguida é apresentado o medidor e o procedimento de calibração do sistema. Finalmente são discutidos os resultados obtidos e as conclusões finais.

Palavras-chave: Classificador espiral; Densidade; Dinâmica dos fluidos; Overflow; Pressão.

¹ IX Seminário de Automação de Processos, 05 a 07 de Outubro de 2005, Curitiba – PR.

² Engenheiro Eletrônico, MSc. Engenheiro de Controle e Automação Industrial da Usina de Minério de Ferro de Carajás, CVRD – Companhia Vale do Rio Doce.

1 INTRODUÇÃO

Usinas de processamento de minério utilizam diversos equipamentos de separação física das misturas de minério e água usada no processo. Entre tais equipamentos estão os “classificadores espirais”, constituídos por um reservatório com uma haste espiral girante, conforme mostrado na Figura 1. Tais equipamentos recebem como entrada uma mistura de minério e água, proveniente de fases anteriores do processo, devendo realizar uma separação física entre o minério e a água, baseada na sedimentação do minério.

No processo de separação, a mistura minério+água entra no classificador através de comportas laterais. O minério sedimenta-se no fundo do classificador, sendo coletado pela espiral girante e recebendo a denominação de “underflow”. A água da mistura, contendo partículas de minério em suspensão, constitui uma polpa (lama) de minério denominada de “overflow” e sai do classificador por transbordo, em sentido oposto ao underflow. O minério do underflow segue para fases posteriores de processamento mineral, enquanto o overflow é utilizado na reciclagem de água de processo. Em resumo, o classificador realiza uma separação física da mistura em underflow (minério com menos água) e overflow (água com partículas de minério). A densidade do overflow é uma variável fundamental para o controle eficiente do processo de separação do classificador. A Figura 2 mostra um classificador da Usina de Carajás.

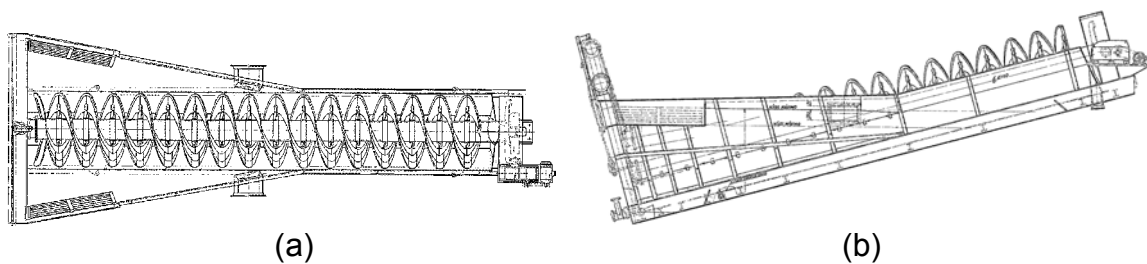


Figura 1. Classificador espiral típico: (a) vista superior. (b) vista lateral.



Figura 2. (a) Classificador espiral em operação. (b) Detalhe mostrando a espiral do classificador. Note o operador ao lado do classificador.

Desde a entrada em operação da Usina de Carajás, em 1985, as medições de densidade de polpa de minério foram feitas unicamente em tubulações, por meio de densímetros radioativos, que demandam cuidados e procedimentos específicos para operação segura, e que são inviáveis de adaptação aos classificadores espirais devido aos riscos de segurança. As medições de densidade de overflow foram sempre feitas de forma manual, a intervalos de meia hora, sendo esse serviço

realizado por pessoal de empresa terceirizada, especificamente contratada para tal. A falta de um sistema de medição on-line da densidade de overflow impossibilitava um monitoramento contínuo do processo de separação dos classificadores, bem como a implantação de malhas de controle de densidade.

A fase inicial do trabalho consistiu de uma análise das características técnicas de diversos equipamentos de medição não-radioativos disponíveis no mercado: medidor por garfo vibrante (vibrating fork), medidor ultrasônico, medidor coriolis e medidor de pressão diferencial, sendo que este último forneceu a melhor solução custo-benefício, levando-se em conta os custos de aquisição, implantação e manutenção (VIANA, 2004). Para instalação do medidor no classificador, foi desenvolvido um duto de drenagem (amostragem) contínua do overflow, conforme mostrado na Figura 8.

2 ASPECTOS TEÓRICOS SOBRE A MEDIÇÃO DE DENSIDADE DE LÍQUIDOS

2.1 Densidade da Água

Uma vez que a polpa de overflow dos classificadores é uma mistura de água e partículas de minério em suspensão, é importante conhecer os efeitos da pressão e da temperatura sobre a densidade da água. A Tabela 1 mostra os valores de densidade da água para algumas condições de pressão e temperatura (RESNICK & HALLIDAY, 1984).

Tabela 1. Variação da densidade da água com a pressão e a temperatura.

	1 atm	50 atm
0 °C	1,000 g/cm ³	1,002 g/cm ³
100 °C	0,958 g/cm ³	0,959 g/cm ³

Pela Tabela 1 vê-se que as variações de pressão e temperatura pouco alteram a densidade da água em relação ao seu valor de referência normalmente considerado (1,0 g/cm³), tendo variação desprezível com a pressão. Em termos práticos, isto significa que a água pode ser considerada um **líquido incompressível**, o que é válido também para a polpa de minério, pois as partículas sólidas em suspensão tendem a aumentar a incompressibilidade. O conceito de líquido incompressível foi aqui introduzido porque será citado mais adiante, no princípio físico de medição de densidade de um líquido escoando através de um duto.

2.2 Pressão Hidrostática em um Líquido

Em um recipiente contendo um líquido de densidade uniforme em repouso, a pressão em qualquer ponto de uma seção horizontal do líquido é a mesma, sendo igual à soma da pressão externa sobre a superfície do líquido e da pressão devida ao peso da coluna líquida sobre a seção considerada, denominada de pressão hidrostática (GILES, 1977; RESNICK & HALLIDAY, 1984). A pressão hidrostática é dada pelo produto entre a densidade do líquido ρ , a gravidade g e a altura da coluna líquida. Isto é ilustrado na Figura 3. Para o caso de um líquido contido em um recipiente aberto, a pressão externa P_{ext} é a pressão atmosférica P_{atm} .

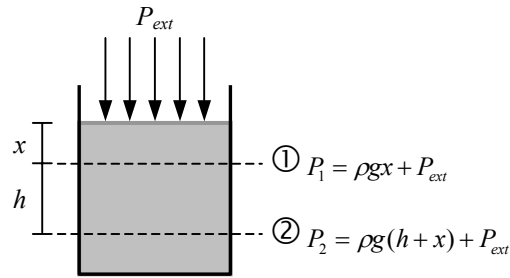


Figura 3. Pressões em um líquido em repouso.

A pressão diferencial entre as superfícies isobáricas ① e ② é:

$$\Delta P = P_2 - P_1 \quad (1)$$

$$\Delta P = (P_{ext} + \rho g(h+x)) - (P_{ext} + \rho g x)$$

$$\Delta P = \rho g h \quad (2a)$$

$$\rho = \frac{\Delta P}{gh} \quad (2b)$$

A adaptação da equação (2b) para o problema de medição contínua da densidade do overflow necessitaria de um medidor de pressão diferencial instalado em um duto de drenagem (amostragem) contínua do overflow, conforme a Figura 8. O valor da densidade ρ seria calculado pelo PLC da planta a partir do valor de ΔP fornecido pelo medidor. A drenagem objetiva renovar a amostra de polpa continuamente, de modo a captar as variações de densidade. Entretanto, a equação (2b) é uma equação hidrostática, ao passo que o overflow escoando pelo duto de drenagem estaria em uma condição hidrodinâmica, havendo uma queda de pressão hidrodinâmica entre as seções de medição ① e ②, decorrente da **perda de carga** no líquido em escoamento (GILES, 1977). Essa queda de pressão seria refletida no valor medido de ΔP medido pelo equipamento, ocasionando erro no cálculo de ρ . Para compensação do efeito de perda de carga considera-se o caso hidrodinâmico, discutido a seguir.

2.3 Perda de Carga de um Líquido em Escoamento

A perda de carga de um líquido em escoamento representa a energia perdida pelo líquido devido à resistência ao escoamento causada por forças de viscosidade do líquido e de atrito com o continente do líquido (GILES, 1977). Para entendermos o efeito da perda de carga, consideremos a Figura 7, que representa um líquido em escoamento, com as seguintes variáveis:

ρ : densidade do líquido

P_1 : pressão na seção ①

P_2 : pressão na seção ②

v_1 : velocidade de escoamento na seção ①

v_2 : velocidade de escoamento na seção ②

V_1 : volume que atravessa a seção ① em um intervalo de tempo Δt

V_2 : volume que atravessa a seção ② em um intervalo de tempo Δt

h_1 : nível da seção ①

h_2 : nível da seção ②

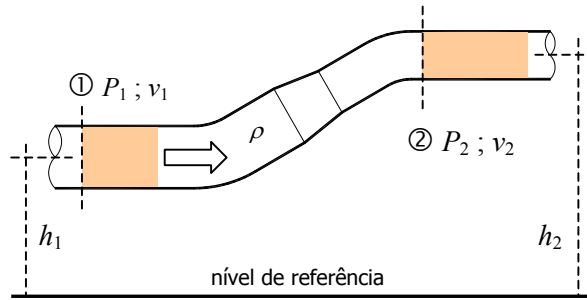


Figura 4. Escoamento de um líquido incompressível e de densidade uniforme.

O princípio de conservação da energia mecânica estabelece que a seguinte relação seja satisfeita pelo **escoamento laminar** (não turbulento) de um **líquido incompressível** (GILES, 1977):

[Energia na seção ①] + [Energia adicionada entre ① e ②] – [Energia retirada entre ① e ②] – [Energia perdida entre ① e ②] = [Energia na seção ②]

que é expressa matematicamente por:

$$\left[\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + h_1 \right] + E_A - E_R - E_P = \left[\frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_2 \right] \quad (3)$$

A Equação (3) é a **Equação de Bernoulli** para o escoamento laminar e incompressível. A equação hidrostática (2) é um caso particular da equação hidrodinâmica (3), pois para uma coluna líquida em repouso, $E_P = E_A = E_R = 0$, $v_1 = 0$ e $v_2 = 0$. A parcela $E_A - E_R - E_P$ é a variação de carga do líquido em escoamento. Para o caso da Figura 4, a energia adicionada E_A é nula porque entre as seções ① e ② não há bombeamento do fluxo existente ou injeção de fluxo adicional. Analogamente, a energia E_R também é nula porque não há retirada de energia (por exemplo, acionamento de uma turbina dentro do duto) ou saída de fluxo entre as seções. Porém, existe uma **perda de carga** E_P devida às forças internas de viscosidade do líquido e forças de atrito entre o líquido e as paredes do duto. Considerando que as seções ① e ② tenham mesmo diâmetro e o líquido seja incompressível, então $v_1 = v_2$, resultando:

$$\left[\frac{P_1}{\rho g} + h_1 \right] - E_P = \left[\frac{P_2}{\rho g} + h_2 \right] \quad (4)$$

$$P_2 - P_1 = \rho g(h_1 - h_2) - \rho g E_P \quad (5)$$

Denotando-se por $\Delta P = P_2 - P_1$ a pressão diferencial entre as seções ① e ②, $h = h_1 - h_2$ a altura de coluna líquida, e $\Phi = \rho g E_P$, a equação (5) fica:

$$\Delta P + \Phi = \rho g h \quad (6a)$$

$$\rho = \frac{\Delta P + \Phi}{g h} \quad (6b)$$

O termo Φ será aqui denominado de **despressurização de carga**. Comparando-se as equações (6b) e (2), vê-se que para um líquido incompressível em escoamento laminar, a determinação de sua densidade necessita do valor da pressão diferencial ΔP (fornecido por um medidor) e da despressurização de carga Φ , sendo g e h conhecidos.

A despressurização de carga Φ pode ser calculada analiticamente em função da geometria do duto e da velocidade de escoamento do líquido (GILES, 1977), ou medida através de um teste de escoamento com um líquido de densidade conhecida, normalmente água. Neste trabalho foi utilizada a segunda alternativa.

3 O MEDIDOR UTILIZADO

Conforme citado na Seção 1, foram avaliadas as características de vários equipamentos de medição disponíveis no mercado, resultando na escolha do medidor de pressão diferencial, mostrado na Figura 5. O corpo do medidor abriga o elemento sensor e toda a eletrônica digital do equipamento. Dois diafragmas remotos são conectados ao corpo do medidor através de tubos capilares preenchidos com um fluido hidráulico específico, como óleo de silicone. Os diafragmas têm a função de fazer contato com o líquido de processo (o overflow), transmitindo hidráulicamente as pressões dos pontos ① e ② para o elemento sensor hidráulicamente através dos tubos capilares (ROSEMOUNT, 2002; YOKOGAWA, 2002).

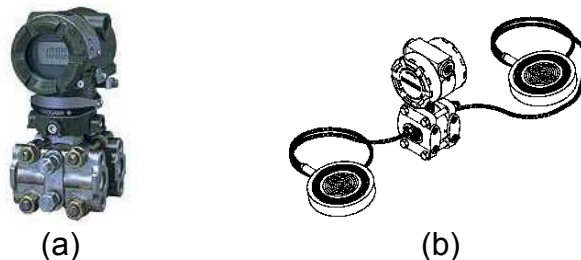


Figura 5. Medidor de pressão diferencial: (a) Corpo do medidor. (b) Diafragmas remotos.



Figura 6. Medidor de pressão diferencial instalado.

No sistema de medição implantado (Figuras 6 e 8), o overflow transborda do classificador para uma calha coletora tendo ao fundo o duto de drenagem. O overflow escoar pelo duto exclusivamente por ação da gravidade. Os dois diafragmas remotos do medidor são conectados ao duto através de flanges espaçadas de uma distância h . A válvula manual no duto serve para ajustar a vazão de drenagem de modo a permitir um escoamento laminar (sem turbulência). Aplicando-se a equação (3) ao duto, tem-se que $E_A = 0$, $E_R = 0$, $v_1 = 0$ e $v_2 = 0$, resultando nas equações (4), (5) e (6) já desenvolvidas.

4 CALIBRAÇÃO E START-UP DO SISTEMA

Antes de ser utilizado na medição de densidade do overflow, o sistema precisa ser calibrado com um líquido de densidade conhecida (água). A calibração envolve duas etapas: uma calibração hidrostática destinada a compensar as pressões internas do fluido dos tubos capilares do medidor, devidas ao desnível entre as posições ① e ② dos diafragmas remotos, e uma calibração hidrodinâmica destinada a compensar a despressurização de carga devida ao escoamento, conforme resumido a seguir.

Considere-se o duto preenchido totalmente com água estática, com a válvula manual totalmente fechada. O valor de ΔP fornecido pelo medidor deve corresponder ao valor teórico dado pela equação hidrostática (2). Fazendo-se então a água escoar pela tubulação a uma velocidade fixa, a pressão diferencial ΔP medida será menor que na condição hidrostática, devido à existência da despressurização de carga Φ . A diferença entre os valores de ΔP medidos na condição hidrostática e na condição hidrodinâmica corresponde ao valor de Φ na equação (6b). Esse valor deve então ser usado como parcela fixa de correção, sendo somado à medida de pressão diferencial hidrodinâmica fornecida pelo medidor, de modo a compensar a perda de carga. O valor de Φ assim determinado, através de um teste com água, continuará sendo válido para a polpa de overflow escoando pela tubulação porque Φ independe da densidade do líquido e a viscosidade da polpa é similar à da água. Entretanto, o valor de Φ depende da velocidade de escoamento do líquido, e portanto só será válido para a abertura de válvula considerada. O procedimento de calibração do sistema é dado a seguir.

4.1 Calibração Hidrostática

1. Calcular pela equação (2a) o valor da pressão hidrostática ΔP para a distância h no duto e a densidade da água (esta é menor densidade possível ρ_{min} para o overflow).
2. Idem, para a densidade máxima ρ_{max} de overflow.
3. Com o duto de drenagem vazio, ajustar o “zero” do medidor para zerar a pressão diferencial devida ao fluido dos tubos capilares do medidor, obtendo-se uma indicação $\Delta P \approx 0,0 \text{ mmH}_2\text{O}$.
4. Fechar a válvula do duto e enchê-lo com água estática deixando os pontos ① e ② imersos.
5. Verificar se a pressão diferencial fornecida pelo medidor corresponde ao valor calculado no passo 1. Se necessário, fazer pequenos ajustes no “zero” para uma melhor aproximação do valor dado por (2)
6. Usando a equação (2a), calcular as pressões ΔP_{min} e ΔP_{max} correspondentes aos valores de ρ_{min} e ρ_{max} , e ajustar a faixa de medição (*range*) do medidor para $[\Delta P_{min}, \Delta P_{max}]$.

4.2 Calibração Hidrodinâmica

7. Abrir a válvula de drenagem, mantendo um escoamento não turbulento da água.
8. Verificar a nova indicação de ΔP fornecida pelo medidor.
9. Calcular a queda de pressão do item 8 em relação à pressão hidrostática do item 1: esta é a despressurização de carga Φ .

10. Incrementar o “zero” do medidor com o valor calculado de Φ : compensação da perda de carga.
11. Verificar se a indicação de ΔP está novamente próxima do valor hidrostático (com a água ainda em escoamento!). Caso necessário, fazer pequenos ajustes no “zero” para uma melhor aproximação do valor hidrostático.

5 START-UP DO SISTEMA DE MEDIÇÃO: RESULTADOS E DISCUSSÃO

A distância entre os centros dos diafragmas remotos foi medida como $h = 1.370$ mm. A densidade máxima possível para o overflow, informada pelos operadores da planta, foi $\rho_{max} = 1,6$ g/cm³ = 1.600 Kg/m³. Portanto, pela equação (2a), a máxima pressão diferencial de trabalho do medidor era $\Delta P_{max} = 21.496,18$ Pa = **2.192 mmH₂O**. A pressão diferencial correspondente a $\rho_{min} = 1,0$ g/cm³ seria $\Delta P_{min} = 1.370$ mmH₂O. A faixa de medição do medidor foi programada para $[\Delta P_{min}, \Delta P_{max}]$.

Com o duto vazio, o medidor indicou uma pressão diferencial $\Delta P = -1.253,4$ mmH₂O. O valor foi negativo porque como $\Delta P = P_2 - P_1$ e o diafragma conectado ao ponto ① está acima do diafragma conectado ao ponto ②, os fluidos hidráulicos dos capilares ocasionam $P_2 > P_1$. O “zero” do medidor foi incrementado de +1.253,4 mmH₂O, levando a uma indicação $\Delta P \approx 0,0$ mmH₂O.

Com a válvula totalmente fechada, o duto foi então enchido com água, e o medidor deu uma excelente indicação $\Delta P = 1.367,6$ mmH₂O, em relação ao valor teórico $\Delta P_{min} = 1.370$ mmH₂O. Nessas condições, o PLC indicava uma densidade $\rho = 0,998$ g/cm³, conforme a Figura 9. O “zero” do medidor foi incrementado de um pequeno valor, passando a indicar $\Delta P = 1.371,2$ mmH₂O, melhorando a indicação de densidade no PLC para $\rho = 1,0009$ g/cm³, concluindo a calibração hidrostática.

Abrindo-se a válvula de duas voltas para permitir o escoamento da água pelo duto, a indicação de pressão do medidor caiu para $\Delta P = 1.129,3$ mmH₂O ($\rho = 0,824$ g/cm³), correspondendo a uma despressurização de carga $\Phi = 241,9$ mmH₂O. O “zero” do medidor foi então incrementado deste valor, para compensar a perda de carga, corrigindo a indicação de pressão para $\Delta P = 1.370,1$ mmH₂O e de densidade para $\rho = 1,00007$ g/cm³. Isto concluiu a calibração hidrodinâmica. Finalmente o overflow foi liberado no duto, observando-se sua densidade atingir valores acima da densidade da água.

Para validação das medições, os valores de densidade calculados pelo PLC foram confrontados com medições manuais de referência. Para tanto, amostras de polpa eram coletadas em um recipiente (becker) de volume conhecido, através de uma torneira no duto próxima ao medidor, e pesadas em uma balança eletrônica, calculando-se então a densidade pelo quociente massa/volume. Calculou-se então o erro relativo entre o valor fornecido pelo PLC e o valor de referência. A Figura 7 mostra o erro relativo para uma série de 52 amostras, tomadas a intervalos de meia hora. O valor médio do erro foi de 0,24%, com desvio-padrão de 1,28%. Uma vez que os operadores do processo requeriam uma precisão de $\pm 2,5\%$, as medições obtidas com o sistema foram consideradas adequadas.

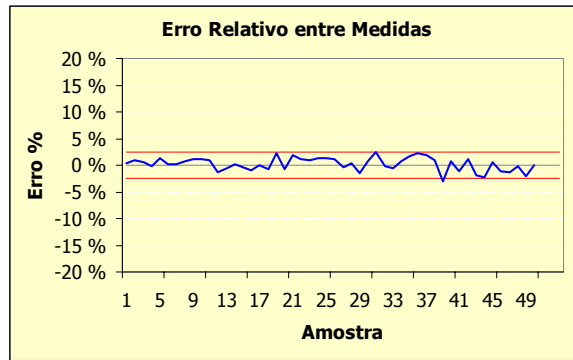


Figura 7. Validação das medidas obtidas com o sistema.

6 CONCLUSÕES

O sistema de medição concebido tornou possível o acompanhamento em tempo real da densidade do overflow do classificador no qual foi implantado. Planeja-se padronizar o sistema de medição para os demais classificadores da Usina, visando eliminar as medições manuais de densidade e melhorando a supervisão do processo. O trabalho também abriu caminho para a futura implantação de malhas de controle de densidade dos classificadores, utilizando realimentação de densidade.

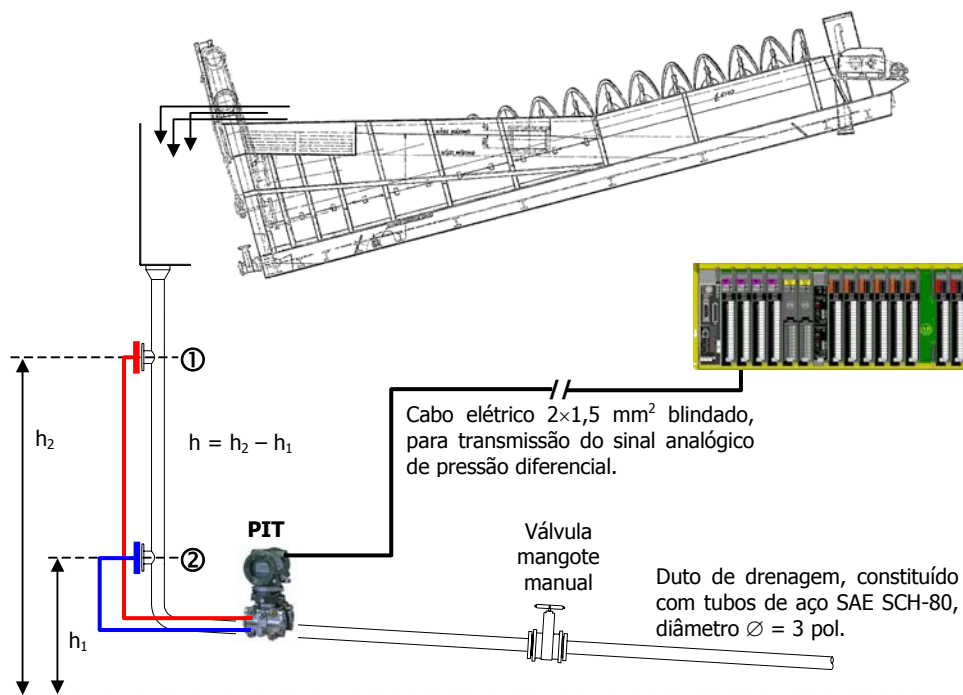


Figura 8. Sistema de medição de densidade implantado.

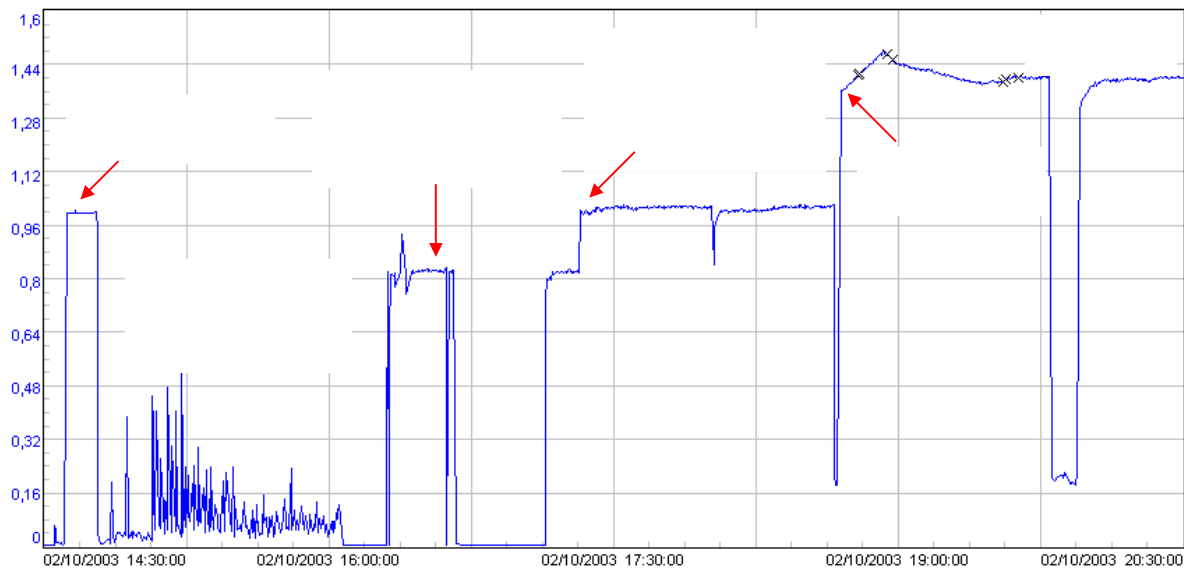


Figura 9. Calibração do sistema de medição e liberação para operação. O sinal mostrado é a densidade calculada em tempo-real pelo PLC a partir das medidas de pressão diferencial ΔP fornecidas pelo medidor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 CVRD Projeto Ferro Carajás. **DF-131K-24-0002/0001**: Instalação, Chumbação e Cargas do Classificador Espiral, Rev. 4. Carajás, PA, 13 Ago. 1984.
- 2 CVRD Projeto Ferro Carajás. **FD-131K-77-6200**: Transmissor de Pressão Diferencial PIT-131K-201 a 211 - Folha de Dados, Rev. 0. Carajás, PA, 15 Out. 2003.
- 3 GILES, R.V. Fundamentos de Escoamento dos Fluidos. In: _____. **Mecânica dos Fluidos e Hidráulica**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, Coleção Schaum, 1977. Cap. 6, p. 106-142.
- 4 RESNICK, R.; HALLIDAY, D. Estática dos Fluidos. In: _____. **Física**. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos, Volume 2, 4ª Edição, 1984. Cap. 17, p. 73-87.
- 5 RESNICK, R.; HALLIDAY, D. Dinâmica dos Fluidos. In: _____. **Física**. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos, Volume 2, 4ª Edição, 1984. Cap. 18, p. 88-107.
- 6 ROSEMOUNT. **Diaphragm Seal Systems**: Product Data Sheet 00813-0100-4016. Chanhassen, MN, USA: Rosemount Inc, 2002.
- 7 SMAR EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS. **Industrial Automation HART/4-20 mA Catalog Book 2001**. São Paulo, SMAR, 2001.
- 8 SPERRY-VICKERS CORPORATION. **Mobile Hydraulics Manual M-2990-A**. Troy, MI, USA: Sperry Corporation, 2nd Edition, 1979.
- 9 VIANA, S.A.A. Medição de Densidade de Overflow de Classificadores Usando Sensor de Pressão Diferencial. **Relatório Técnico**, Carajás, PA, Jan. 2004.
- 10 YOKOGAWA ELECTRIC CORPORATION. **Yokogawa Field Instruments: Bulletin 0A3A1-E**. Tokyo, Japan: Yokogawa, 2000.
- 11 YOKOGAWA ELECTRIC CORPORATION. **Model EJA-110A, EJA-120A and EJA-130A Differential Pressure Transmitters User's Manual**: Document IM-01C21B01-01E. Tokyo, Japan: Yokogawa, 7th Edition, 2002.

MEASURING THE DENSITY OF IRON ORE PULP USING A DIFERENTIAL PRESSURE TRANSMITTER

Sidney Antonio Araujo Viana

Abstract

This work concerns the implantation of a liquid density measurement system with measuring principle based on the Bernoulli Equation for incompressible fluids. The Bernoulli Equation relates the differential pressure in a fixed-height liquid column to its density, so that the density can be calculated from the measured differential pressure. The implantation of the system was motivated by the need for on-line measurement of the density of iron ore slurry (overflow) from spiral classifiers at the Carajás Iron Ore Processing Plant, CVRD – Companhia Vale do Rio Doce, Brazil. The system uses a two flanged diaphragm seals diferencial pressure transmitter (PIT), which sends the measurements to the plant's Programable Logic Controller (PLC). The PLC then on-line calculates the density from the differential pressure measurements. This article is organized as follow: firstly, the operation principle of a spiral classifier is briefly described, and some relevant aspects of the water density, hidrostatic and hidrodinamic pressure in a liquid are considered. Then one's presented the PIT metter, and the calibration procedure of the measurement system. Finally the results obtained and concluding remarks are presented.

Key words: Density; Fluid dynamics; Overflow; Pressure; Spiral classifier.