

Aula 3: Instrumentos de Medida

Prof. Gabriel de Castro Fonseca (DQBIO/UFSJ)
Instrumentação e Controle de Bioprocessos

Contextualização

Como funciona um instrumento de medida?

Conforme mencionado na última aula, instrumentos de medida são compostos por dois elementos: o sensor (elemento primário) e o transmissor (elemento secundário). O sensor é o componente que produz um fenômeno físico diretamente relacionado à variável medida; enquanto o transmissor converte esse fenômeno em um sinal padronizado (pneumático de 3 a 15 psi, elétrico de 4 a 20 mA ou digital *fieldbus*) que pode ser passado para outros equipamentos. É possível que sensor e transmissor sejam um mesmo objeto.

Existem muitos tipos de sensores/transmissores e listar todos eles seria exaustivo. De forma geral, na indústria química e de bioprocessos os instrumentos de medida mais importantes envolvem:

- Pressão
- Vazão
- Analisadores
- Nível
- Temperatura

Pressão e temperatura são variáveis importantes para avaliar o estado termodinâmico, a cinética de reações e inclusive a segurança do processo. Medidas de vazão e nível são importantes para a realização de balanços materiais, impedindo por exemplo que tanques transbordem ou se esvaziem. Analisadores são instrumentos que fazem medidas de propriedades físico-químicas como composição, acidez, dureza, densidade e viscosidade – essa é uma categoria muito ampla e sua explicação ficará a cargo dos alunos por apresentação de seminários. As outras quatro são o tema da aula de hoje.

Medidas de pressão

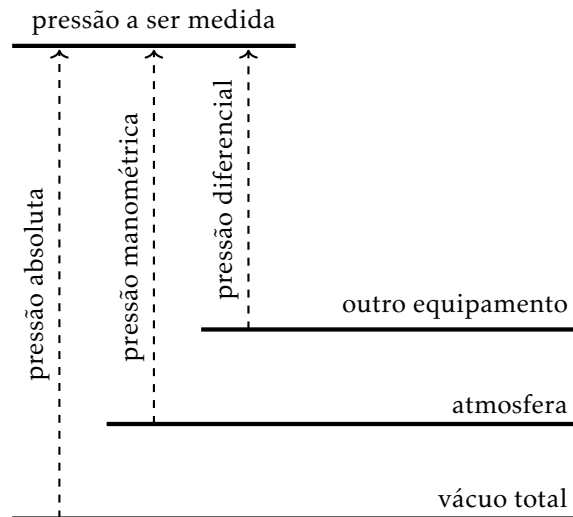
Qual a importância de medidas de pressão em bioprocessos?

A pressão é definida como a razão entre uma força e a área sobre a qual ela é aplicada, $p = \frac{F}{A}$. Sua unidade no Sistema Internacional é o pascal, $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$.

A pressão tem uma influência relativamente pequena sobre o metabolismo de microrganismos, exceto em casos extremos. Ela pode ter uma influência indireta, todavia, na medida em que afeta por exemplo a solubilidade de gases dissolvidos. O controle da pressão também é importante em equipamentos periféricos como bombas, compressores, caldeiras e equipamentos de separação.

Como se mede a pressão?

Figura 1: Referenciais para medidas de pressão.



Medidas de pressão geralmente se baseiam em uma deformação mecânica do elemento sensor. Essa deformação é consequência do balanço de forças entre a região cuja pressão deseja-se conhecer e uma região de referência. Assim sendo, medidas de pressão precisam ser feitas em relação a uma pressão de referência, como mostrado na Figura 1.

- Pressão absoluta: medida em relação ao vácuo; é a pressão total de uma substância.
- Pressão manométrica: medida em relação à pressão atmosférica local; mostra o quanto um equipamento está pressurizado.
- Pressão diferencial: diferença de pressão entre dois equipamentos.

Um dos princípios mais simples usados em sensores de pressão é o deslocamento de uma extremidade. Isso é observado, por exemplo, em sensores de **diafragma**, **fole** (uma bolsa inflável) ou **tubos Bourdon**. Estes últimos se tratam de tubos metálicos ocos com forma de helicóide, espiral ou “C” (Figura 2).

No tubo Bourdon, o fluido cuja pressão desejamos conhecer tem acesso à parte interna do tubo oco e a diferença de pressão entre o interior e o exterior faz com que o tubo se movimente, como uma “língua-de-sogra.”

A extremidade do tubo Bourdon pode estar conectada a um indicador associado a uma escala graduada ou a um transmissor. O transmissor neste caso poderia ser, por exemplo, um equipamento que traduzisse o deslocamento do sensor em um sinal elétrico. Uma opção interessante seria um **potenciômetro**, que consiste de um circuito com uma fonte de tensão, um resistor e um contato móvel que funciona como divisor de tensão.

Figura 2: Tubo Bourdon C.

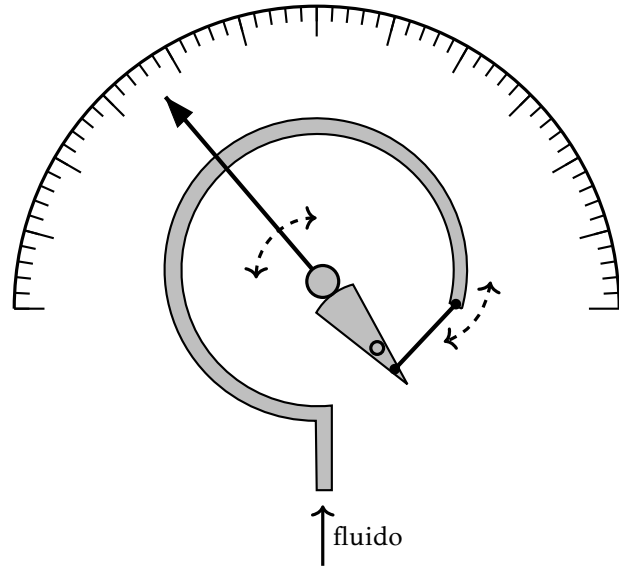
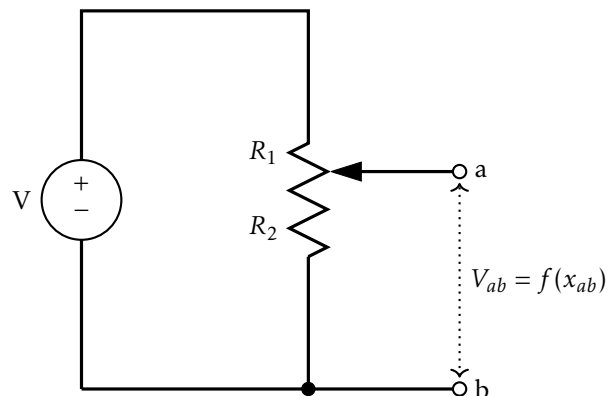


Figura 3: Circuito com potenciômetro.



Como funciona o potenciômetro?

No potenciômetro esquematizado na Figura 3, o ponto “a” é uma extremidade do contato móvel conectada ao sensor. O movimento do tubo Bourdon faz a outra extremidade do contato deslizar ou girar, de modo que o ponto em que ela toca o resistor é função da pressão medida.

A fonte gera uma tensão elétrica V conhecida que atravessa toda a extensão do resistor, com resistência $R = R_1 + R_2$, também conhecida e produz uma corrente elétrica I . Se você medir a diferença de potencial entre os terminais “a” e “b” do circuito, todavia, você observará uma tensão $V_{ab} \leq V$ que é função da posição do contato móvel. Isso acontece porque entre os dois contatos, a mesma corrente I atravessa uma resistência $R_2 \leq R$, então a a diferença de potencial nesse caso é $V_{ab} = R_2 I \leq V = (R_1 + R_2) I$.

Figura 4: Célula capacitiva (Alves, 2010).

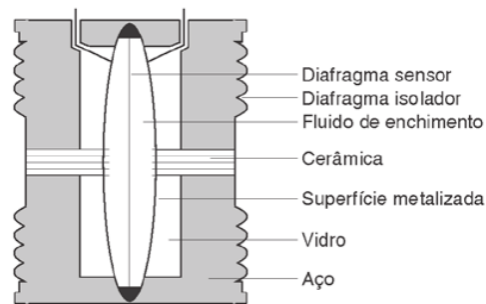
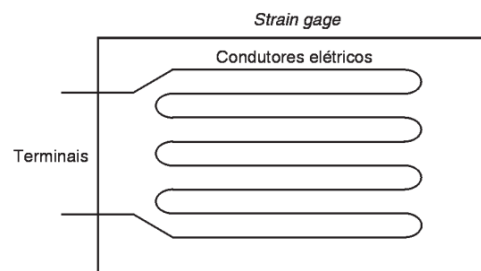


Figura 5: Fita extensiométrica (Alves, 2010).



Existem outras maneiras de medir pressão?

Sensores baseados exclusivamente em deformação mecânica e transmissores potenciométricos não são as únicas maneiras de medir pressão. Há diversos instrumentos de medida possíveis e o objetivo desta aula não é falar sobre todos eles. Dois equipamentos que valem a pena ser mencionados são a **célula capacitiva** e a **fita extensiométrica**. Em ambos os casos, além de deformação mecânica, a pressurização também provoca mudanças em suas propriedades elétricas que podem ser transmitidas diretamente. Esses equipamentos, portanto, funcionam ao mesmo tempo como sensores e transmissores.

A célula capacitiva (*DP-cell**), mostrada na Figura 4, é o sensor mais utilizado. Consiste de duas câmaras isoladas por um diafragma metálico. Além de isolar regiões com pressões diferentes, esse diafragma funciona como uma placa de capacitor. Há outras duas placas metálicas, uma de cada lado do diafragma, de forma que as três placas formam dois pares de capacitores. Em condições de equilíbrio (pressões iguais em ambos os lados da célula), as placas são equidistantes e têm a mesma capacitância. Por outro lado, diferenças de pressão deformam o diafragma levando a um pequeno aumento na capacitância de um par de capacitores e uma pequena redução na capacitância do outro (a capacitância é inversamente proporcional à distância entre as placas). Essa diferença da ordem de picofarads é detectada por um circuito acoplado à célula que transmite essa informação na forma de um sinal elétrico ou digital proporcional à diferença de pressões medida.

* *Differential pressure cell*, célula de pressão diferencial.

Existem outras maneiras de medir pressão?

Uma fita extensiométrica (*strain gauge/gage*), mostrada na Figura 5 é um equipamento indicado para medir tensões de cisalhamento – algo muito útil em um reator fermentador de tanque agitado, onde altos cisalhamentos podem levar à ruptura da parede celular. Consiste de um condutor elétrico longo arranjado num padrão de “zig-zag” sobre uma fita adesiva colada a uma superfície. A disposição do condutor faz com que ele seja extremamente sensível a deformação em um direção e não em outras. Assim, tensões de cisalhamento na direção preferencial de distensão levam a um aumento no comprimento do fio, e consequentemente na sua resistência elétrica (a resistência é diretamente proporcional ao comprimento do condutor), o que pode ser explorado por um circuito conectado à fita para transmitir um sinal elétrico ou digital proporcional ao cisalhamento.

Medidas de nível

Como se mede o nível?

O nível é a altura de um tanque com líquido e está diretamente relacionado ao volume e à massa ele armazenada. Sua medida é importante para avaliação de estoques e controle de processos contínuos. Reatores, por exemplo, são projetados para funcionar preenchidos com um volume específico de líquido e variações indesejadas no nível podem afetar a conversão e as trocas de calor no equipamento.

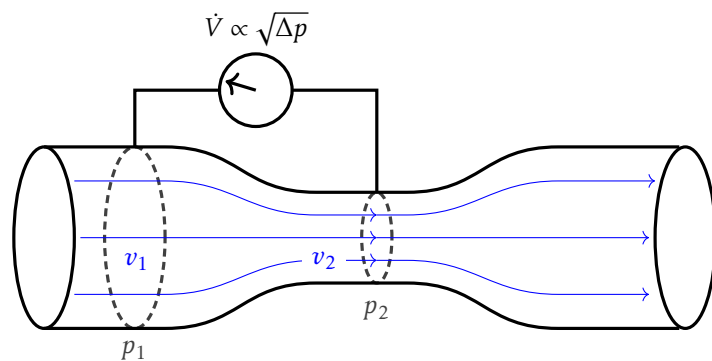
Os instrumentos de medida de pressão podem ser usados para medida do nível de tanques, mas também existem outros instrumentos mais específicos, como **deslocadores** ou **sonar**. Deslocadores são cilindros que pendem de uma balança. A balança mede o peso do cilindro e o transmite como um sinal elétrico ou digital proporcional a uma deformação em uma mola (pode-se usar um potenciômetro, por exemplo). O peso do cilindro é conhecido, mas quando ele está parcialmente imerso em líquido, o empuxo do fluido reduz seu peso aparente, e isso pode ser correlacionado com o nível do tanque.

A medida por sonar* se baseia no cálculo do tempo entre a emissão de um ruído ultrassônico e a detecção de seu eco após refletir na superfície líquida do tanque. Sabendo-se a velocidade do som no meio material (o emissor pode estar tanto acima quanto abaixo da superfície), é possível calcular a distância percorrida pela onda sonora, e portanto o nível do tanque. A existência de bolhas, espuma ou movimento na superfície pode prejudicar essa medida.

**Sound navigation and ranging*, navegação e determinação de distâncias por som.

Medidas de vazão

Figura 6: Tubo de Venturi.



Como se mede a vazão?

O controle de vazões é importante pelas mesmas razões que o controle de nível, uma vez que essa variável está presente nos balanços materiais e de energia de qualquer processo contínuo. Existe uma grande quantidade de instrumentos de medida de vazão baseados em vários princípios físicos diferentes.

Assim como o nível, a vazão pode ser medida de forma indireta usando-se instrumentos medidores de pressão diferencial. Segundo a Equação de Bernoulli (Eq. (1)), a pressão de um fluido diminui quando sua velocidade aumenta. Isso pode ser explorado em instrumentos de medida conhecidos como **elementos deprimogênicos**, como placas de orifício e tubos de Venturi (Figura 6). Como a vazão de um fluido incompressível não se altera quando ele atravessa um volume de controle em regime permanente, um “estrangulamento” na área do tubo causa uma mudança na sua velocidade, que por sua vez gera uma diferença de pressão que pode ser medida por uma célula diferencial.

$$p_1 + \rho g z_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} = p_2 + \rho g z_2 + \rho \frac{v_2^2}{2} \quad (1)$$

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} \left(\frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2} \right) \dot{V}^2 \quad (2)$$

Outros princípios usados para medidas de vazão incluem:

- **Medidores mecânicos:** o movimento do fluido gira dispositivos mecânicos como hélices, pás ou engrenagens. A velocidade de rotação é proporcional à vazão.
- **Medidores ultrassônicos:** emissor gera onda ultrassônica e após detecção por receptor, calcula-se tempo de trânsito ou desvio Doppler da frequência.

Como se mede a vazão?

- **Medidores eletromagnéticos:** ao passar por um campo magnético gerado por bobinas, um fluido condutor de eletricidade (mesmo um relativamente pouco condutor) gera um campo elétrico detectável.
- **Medidor Coriolis:** um trecho em forma de “U” da tubulação vibra acionada por um eletroímã, gerando um pequeno movimento giratório por um curto intervalo de tempo. A força de Coriolis provoca uma torção mensurável no tubo. Diferentemente dos outros métodos, que medem vazão volumétrica, este método mede diretamente a vazão mássica.
- **Medidor térmico:** aquece-se uma seção do tubo a uma taxa conhecida e um sensor mede a temperatura do fluido pouco depois. Usado para medida de vazões gasosas.

Medidas de temperatura

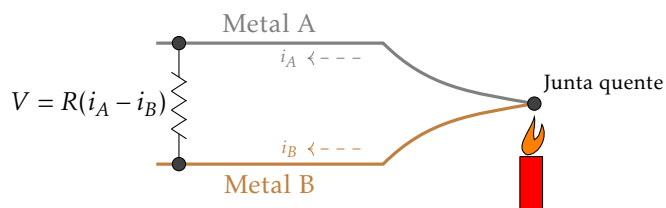
Como se mede a temperatura?

A temperatura é uma das variáveis de processo mais importantes, uma vez que afeta um grande número de propriedades da matéria, como densidade, viscosidade, entalpia e cinética de reação. Uma vez que tantas propriedades sofrem influência da temperatura, não deve ser surpresa que exista uma variedade de dispositivos de medida de temperatura baseados em diversos princípios físicos. Podemos destacar os sensores baseados em dilatação, propriedades elétricas e propriedades ópticas.

O termômetro de mercúrio clássico é um sensor baseado em dilatação, mas conforme discutimos na última aula, existe dificuldade em transmitir sua leitura como um sinal útil para instrumentação. Um outro exemplo mais interessante é o **sensor bimetálico**, que consiste de dois metais com coeficientes de dilatação diferentes soldados um ao outro. Mudanças de temperatura provocam uma deformação do conjunto que pode ser detectada por um potenciômetro. Bimetais podem ser projetados na forma de espirais ou helicoides para amplificar o deslocamento da sua extremidade livre.

Não confunda os bimetais com os termopares (Figura 7), sensores de temperatura que também são constituídos por dois metais, mas se baseiam em um princípio físico completamente diferente!

Figura 7: Funcionamento de termopar.



Como funciona o termopar?

Os **termopares** se baseiam em um fenômeno elétrico conhecido como Efeito Seebeck. A nível microscópico, um metal é um conjunto de cátions envolto por uma nuvem eletrônica. Os elétrons que fazem parte dessa nuvem têm muito mais mobilidade que os cátions, e é graças a eles que os metais têm boa condutividade térmica e elétrica.

Se um fio metálico tem duas extremidades a temperaturas diferentes, os elétrons na ponta mais quente estarão mais agitados que aqueles na ponta mais fria; isso resultará em um movimento líquido de elétrons de uma extremidade até a outra, ou seja, uma corrente elétrica que é proporcional à diferença de temperaturas. Esse fenômeno é conhecido como *efeito termoelétrico*.

Podemos usar a corrente elétrica gerada pelo efeito termoelétrico como medida de temperatura, bastando para isso conectar as duas extremidades do fio ao um amperímetro. Mas isso não seria uma boa ideia: a precisão do amperímetro varia com a temperatura, por isso é importante que os dois terminais em contato com o equipamento estejam à mesma temperatura.

Podemos assegurar que isso aconteça dobrando nosso fio em forma de "U", assim seria possível manter os dois terminais do fio em contato com o amperímetro a temperatura ambiente e colocar o ápice da curva em contato com a temperatura medida. Isso ainda não é uma boa ideia: como a diferença de temperatura entre o ápice e cada uma das extremidades do fio é a mesma, o amperímetro medirá duas correntes iguais em sentidos contrários; elas se anulam e nenhuma corrente é medida.

A grande ideia que torna possível a medição de temperaturas é soldar dois fios de metais diferentes. O ponto de solda é chamado *junta quente*, e ele fica em contato com a temperatura medida. As duas extremidades livres são conectadas ao amperímetro. Como cada fio é formado por um metal diferente, a corrente elétrica gerada por uma mesma diferença de temperatura será diferente, assim o amperímetro é capaz de medir uma corrente líquida não nula e associá-la a uma diferença de temperaturas. Essa corrente mensurável entre dois metais diferentes é o chamado Efeito Seebeck, um caso particular do efeito termoelétrico.

Como funcionam outros instrumentos de medida de temperatura?

Além dos termopares, outros importantes instrumentos de medida de temperatura baseados em propriedades elétricas da matéria são os **termorresistores** e os **termistores**. Ambos se baseiam em variações da resistividade elétrica de materiais com a temperatura, a diferença é que os termorresistores (também chamados termorresistências ou RTD*) são materiais metálicos e os termistores são materiais cerâmicos semicondutores. Um dos termorresistores mais comuns é o Pt100, um fio de platina calibrado para ter resistência de exatamente $100\ \Omega$ a $0\ ^\circ\text{C}$; aumentos de temperatura levam a um aumento da resistência elétrica, e isso pode ser detectado aplicando-se uma tensão constante entre os terminais do fio e medindo a corrente elétrica.

Termistores funcionam de forma semelhante, mas para a maioria deles a resistência diminui quando a temperatura aumenta. São mais sensíveis que os termorresistores, mas seu comportamento é menos linear, de forma que são mais difíceis de calibrar.

Finalmente, é interessante mencionar medidores ópticos de temperatura, conhecidos como **pirômetros**. Esses dispositivos detectam radiação eletromagnética. Geralmente são utilizados para medir a temperatura de fornos, caldeiras e outros equipamentos muito quentes a partir de uma distância segura.

*Resistance temperature detector, detector de resistência por temperatura

Resumo

Instrumentos de medida

Há um grande número de instrumentos aplicáveis para a medida das principais variáveis de processo (pressão, nível, vazão e temperatura). Os sensores sofrem alterações em suas propriedades físicas ou geométricas e elas são convertidas em sinais instrumentáveis por transmissores.

Bibliografia

- [1] L.A. Aguirre (2013). Fundamentos de Instrumentação. Capítulo 7 a 10.
- [2] J.L.L. Alves (2010). Instrumentação, Controle e Automação de Processos, 2ª ed. LTC. Capítulos 2 e 3.
- [3] C.A. Smith, A. Corripio (2008). Princípios e Prática do Controle Automático de Processo. 3ª ed. LTC. Capítulo 5 e Apêndice C.
- [4] W.Y. Svrcek, D.P. Mahoney, B.R. Young. (2014). A Real-Time Approach to Process Control. 3rd ed. Wiley. Capítulo 2
- [5] W. Schmidell et al. (2001). Biotecnologia Industrial - Volume 2: Engenharia Bioquímica. Edgard Blücher. Capítulo 18.