

2

Legislação aplicável ao controle metrológico e procedimentos de calibração de instrumentos de medição

2.1

Evolução do controle metrológico de petróleo e gás no País

Este capítulo tem por finalidade contextualizar a legislação aplicável ao controle metrológico de petróleo e gás natural, e a calibração dos instrumentos de temperatura e pressão estática utilizados em malha de gás natural no Brasil.

Apresenta-se, a seguir, a evolução do controle metrológico no País no período de 1997 a 2013.

A Lei nº 9.478, de agosto de 1997 (Brasil, 1997), foi promulgada e ficou conhecida popularmente como a “lei do Petróleo”, que definiu o marco regulatório do setor petrolífero no Brasil.

De interesse ao entendimento deste trabalho destacam-se os seguintes artigos da Lei 9.478:

- Art. 4º - “Constituem monopólio da União, nos termos do [art. 177 da Constituição Federal](#), as seguintes atividades:
 - I - a pesquisa e lavra das jazidas de petróleo e gás natural e outros hidrocarbonetos fluidos;
 - II - a refinação de petróleo nacional ou estrangeiro;
 - III - a importação e exportação dos produtos e derivados básicos resultantes das atividades previstas nos incisos anteriores;
 - IV - o transporte marítimo do petróleo bruto de origem nacional ou de derivados básicos de petróleo produzidos no País, bem como o transporte, por meio de conduto, de petróleo bruto, seus derivados e de gás natural”.
- Art. 5º - “As atividades econômicas de que trata o art. 4º desta Lei serão reguladas e fiscalizadas pela União e poderão ser exercidas, mediante concessão, autorização ou contratação sob o regime de partilha de produção, por empresas constituídas sob as leis brasileiras, com sede e administração no País”.

- Art. 7º- “Fica instituída a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Combustíveis – ANP, entidade integrante da Administração Federal Indireta, submetida ao regime autárquico especial, como órgão regulador da indústria do petróleo, gás natural, seus derivados e biocombustíveis, vinculada ao Ministério de Minas e Energia”.
- Art. 8º-“A ANP terá como finalidade promover a regulação, a contratação e a fiscalização das atividades econômicas integrantes da indústria do petróleo, do gás natural e dos biocombustíveis”.

A Portaria Conjunta ANP/INMETRO nº 01, de 19 de junho de 2000, aprovou o Regulamento Técnico de Medição de Petróleo e Gás Natural, e estabeleceu condições e requisitos mínimos que os sistemas de medição de petróleo e gás natural devem observar com vistas a garantir confiabilidade metrológica aos resultados das medições de vazão (Agência Nacional do Petróleo e Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia, 2000).

Esta portaria estabeleceu “um prazo máximo de 24 (vinte e quatro) meses, a contar da data de sua publicação para que os sistemas de medição que já estivessem instalados e em utilização se enquadrassem no regulamento”.

Em 2013, entrou em vigor a Resolução Conjunta ANP/INMETRO nº 1, de 10.6.2013 – DOU 12.6.2013 – retificada D.O.U. 17.6.2013, revogando a portaria até então vigente desde 2000.

A Resolução Conjunta ANP/INMETRO nº 1, de 10.6.2013, “passou a vigorar no prazo de 180 dias após a data de sua publicação no Diário Oficial da União”.

Utilizando-se como premissa a legislação aplicável ao controle metrológico, a portaria de 2000 e a sua revisão, que deram origem à resolução de 2013, embasam o objeto de estudo desta dissertação.

2.2

Malha de gás natural com medidor ultrassônico

Para realizar a medição de temperatura e pressão estática em malhas de gás natural, dentre os diversos sistemas de medidores existentes, este trabalho faz uso dos medidores de vazão do tipo ultrassom.

Os medidores baseados na tecnologia de ultrassom foram desenvolvidos na metade do século XX, cuja aplicação para medição de vazão data de 1960. Já a comercialização de medidores confiáveis somente se consolidou na década de 1980, fazendo uso de quartzo piezelétrico, na faixa de dezenas e centenas de kilohertz (Delmée, 2003).

Dentre as características dos medidores do tipo ultrassom para medição de vazão destacam-se a focalização; o feixe ultrassônico, similar a um feixe de luz, que está sujeito aos fenômenos de reflexão total e de refração quando passa de um meio para outro (exemplo: sólido para líquido); e a penetração, que permite que estes instrumentos realizem a medição de vazão de forma não intrusiva (Delmée, 2003).

Por essa razão, a medição de vazão faz uso de transdutores reversíveis, que transformam a frequência elétrica em vibração mecânica operando na mesma frequência, e vice-versa, (Delmée, 2003). A Figura 1 ilustra um desses medidores.



Figura 1: Medidor de vazão Vortex OPTISWIRL 4070

Fonte: (Conaut Controles Automáticos Ltda.)

2.3

Princípios de funcionamento de transmissores

Os primeiros instrumentos utilizados para medição de propriedades do processo limitavam-se à leitura da variável, evoluindo, mais tarde com o surgimento de controladores equipados com unidades centralizadas de supervisão e controle, necessárias à transmissão do sinal. Esta transmissão de sinal na forma de corrente contínua foi padronizada na faixa de 4 a 20 mA (Bega *et al.*, 2011).

Um transmissor ou conversor é um instrumento que converte o sinal de um transdutor em um sinal padrão para processamento remoto (à distância).

Segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia –VIM (Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia, 2012):

“transdutor de medição é um dispositivo utilizado em medição, que fornece uma grandeza de saída que possui uma relação especificada com uma grandeza de entrada”

“sensor é um elemento de um sistema de medição que é diretamente afetado por um fenômeno, corpo ou substância que contém a grandeza a ser medida”

Como exemplo de transdutores passivos, tem-se a célula capacitiva utilizada na medição de pressão. Este transmissor já possui incluídas algumas funções de tratamento de sinais (e.g.: filtragem e linearização). O seu funcionamento requer circuitos necessários à conversão de uma variação de um parâmetro em um sinal elétrico (Bega *et al.*, 2011).

Quanto à indicação local, os transmissores podem ser classificados como: cegos (sem indicação local), ou dotados de indicação local analógica ou digital, conforme ilustrado nas Figuras 2 a 4, respectivamente.



Figura 2: Transmissor cego KROHNE

Fonte: Conaut Controles Automáticos Ltda.



Figura 3: Medidor analógico de vazão Ramc yokogawa

Fonte: (Yokogawa)



Figura 4: Medidor digital de vazão EJA110A Yokogawa

Fonte: (Yokogawa)

Os transmissores cegos expostos na Figura 2 podem receber módulos de indicação local.

Os transdutores que são objetos de estudo deste trabalho são classificados como indicação digital.

Alguns transdutores podem ter sensores acoplados diretamente, ou mesmo posicionados a curta distância. São exemplos de transdutores: (Bega *et al.*, 2011).

- O termopar em poço que possui o sensor acoplado diretamente ao transmissor de temperatura;
- O sensor do transmissor de pressão, apresentado na Figura 5, que está localizado na parte interna do corpo do transmissor, montado diretamente sobre o *manifold*.



Figura 5: Transmissor indicador de pressão CONNECT-JCO da linha TIP-9800

Fonte: (Connect-Jco Tecnologia Brasileira Em Automação Ltda.)

A figura 6 apresenta um exemplo de um transmissor inteligente de pressão.

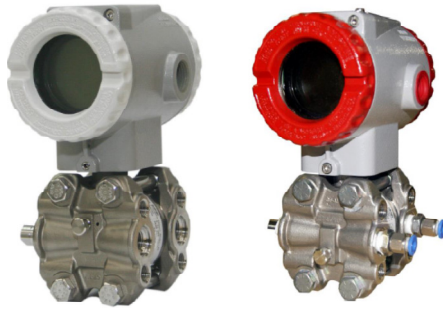


Figura 6: Transmissor inteligente de pressão Smar LD400

Fonte: Smar Equipamentos Industriais

Ainda não existe uma definição exata para transmissores inteligentes microprocessados, mas é possível destacar algumas das facilidades que o compõem, tais como: identificação, configuração, calibração e diagnóstico local, que se realiza por meio de um comunicador portátil conhecido como *hand held*, ou remota, permitindo a integração a sistemas de controle digital Bega (2011).

2.3.1 Transmissor de temperatura

O calor é uma forma de energia associada à atividade molecular de uma substância. “Quanto maior a agitação molecular, maior a quantidade de calor trocada com o meio e maior será a temperatura da substância,” (Bega *et al.*, 2011), Eq. (1).

$$Q = m \times c \times \Delta T \quad (1)$$

Nesta expressão,

Q = quantidade de calor trocada (calor sensível);

m = massa da substância envolvida;

c = calor específico (característica da substância);

ΔT = variação da temperatura.

A temperatura é uma das sete grandezas de base do Sistema Internacional de Unidades (SI) (Instituto Nacional de Metrologia, 2012), e esta pode ser medida por meio de contato físico de dispositivos mecânicos, elétricos ou sem contato utilizando pirômetros (Colman, 2011).

Os elementos primários de medidores de temperatura, detectores ou sensores são denominados transdutores, cujas características termo físicas se alteram com a temperatura (Lira, 2013).

Termômetros de líquido em vidro, termômetros bimetálicos, termômetros de gás, termopares, termistores e termômetros de resistência são transdutores de medição de temperatura por meio de contato (Colman, 2011).

Dentre as várias características dos transdutores de temperatura destacam-se a sua faixa de operação, sensibilidade, incerteza de medição, condição de funcionamento, estabilidade, repetibilidade, tempo de resposta, potência termoeletrica, exatidão, custos, dentre outras.

2.3.1.1

Termômetros de resistência (RTD)

Os transdutores que apresentam uma variação da resistência em função da temperatura são denominados termômetros de resistência, ou bulbos de resistência de fio metálico, ou RTD (*resistance temperature detector*) (Bega et al., 2011), figura 7.

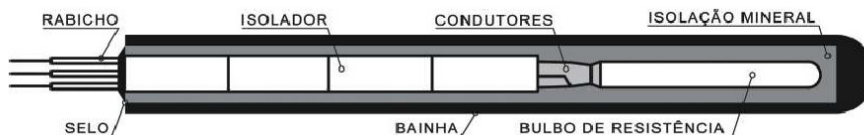


Figura 7: Representação esquemática de um termômetro de resistência

Fonte: (Alutal Controles Industriais Ltda, 2009) apud (Colman, 2011)

Sensores da termorresistência na forma de fios de platina, níquel, cobre, liga de 70% Ni e 30% Fe encontram-se comercialmente disponíveis, a exemplo do sensor Balco (Bega *et al.*, 2011).

A variação da resistência com a temperatura é regida pela equação de Callendar e Van Dusen (Bega *et al.*, 2011).

A resistência relativa em função da variação de temperatura pode, alternativamente, ser calculada pelas expressões a seguir (Colman, 2011):

a) Para temperaturas positivas na faixa de 0 °C a 850°C, Eq. 2:

$$R_t = R_0 \times [1 + At + Bt^2] \quad (2)$$

b) Para temperaturas negativas na faixa de - 200°C a 0°C, Eq. 3:

$$R_t = R_0 \times \left[1 + Bt^2 + Ct^{3 \times (t-100)} \right] \quad (3)$$

Nessas expressões:

R_t = resistência na temperatura “t” °C;

R_0 = resistência a 0°C;

t = temperatura em °C;

A, B e C = coeficientes determinados pela calibração:

$A = 3,90802 \times 10^{-3} \text{ (}^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$;

$B = -5,802 \times 10^{-1} \text{ (}^\circ\text{C}^{-2}\text{)}$;

$C = -4,27350 \times 10^{-12} \text{ (}^\circ\text{C}^{-4}\text{)}$.

2.3.1.2 Sensor Pt100

O sensor Pt100 é composto de elementos de platina, cuja resistência é padronizada na condição 100 Ω a 0°C. Em aplicações industriais é amplamente utilizado devido a sua estabilidade, exatidão e ampla faixa de operação. O fio é preso a um suporte isolante de vidro ou de cerâmica e encapsulado com os mesmos materiais para posterior acondicionamento em um poço (Bega *et al.*, 2011).

A faixa de operação do Pt 100 varia de -250°C até 850°C (Bega *et al.*, 2011).

Uma das características dos termorresistores (no caso em estudo, o Pt 100) reside na sua capacidade de trabalhar associado a circuitos que convertem a variação de resistência em leitura de temperatura ou de sinal padronizado (4-20 mA), garantindo-se, assim, que o sensor não irá auto aquecer; caso ocorra aumento de temperatura, esta deve ser desprezível devido ao baixo valor da corrente circulante (Bega *et al.*, 2011).

A conexão entre os sensores ou transmissores pode se dar por meio de dois, três ou quatro fios, dependendo da aplicação.

Na conexão por dois fios existe a necessidade de ajustar o sistema para que haja a compensação dos termos, cabos de resistência $R_{c1} + R_{c2}$ (este ajuste sofre

alteração dependendo do material ou do comprimento do cabo) (Bega *et al.*, 2011), figura 8.

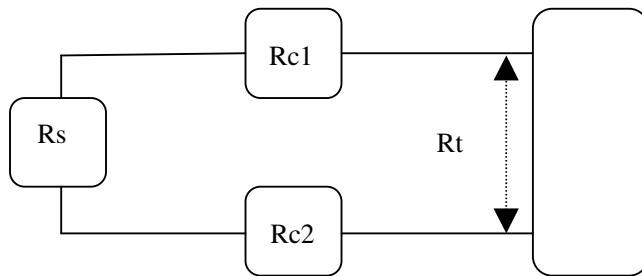


Figura 8: Conexão a dois fios

Fonte: (Bega *et al.*, 2011)

“Na conexão por três fios, a configuração circuito transmissor é tal que, para fins de medição, o sensor “enxerga” uma resistência $R_t = R_1 - R_2$. Desta maneira, sendo $R_{c1} = R_{c2} = R_{c3}$, o efeito da resistência dos fios é cancelado” (Bega *et al.*, 2011), figura 9.

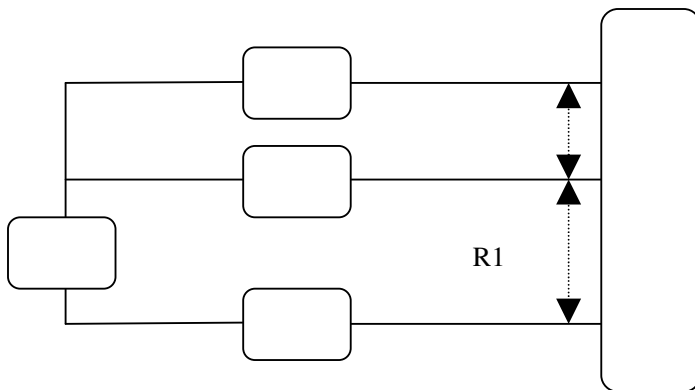


Figura 9: Conexão a três fios

Fonte: Bega *et al.*, 2011

Segundo Bega (2011), na conexão por quatro fios, a medição se dá de forma independente do cabo, ainda que apresente condutores desiguais. A alimentação dos termorresistores dar-se-á através dos terminais A e B, que conectados a um circuito mantém a corrente constante, já a tensão desenvolvida nos sensores é medida nos terminais C e D por um circuito de alta impedância, figura 10.

“Conhecida a corrente e a tensão em R_s , pela lei de Ohm o instrumento determina a sua resistência e, portanto a temperatura.” (Bega *et al.*, 2011)

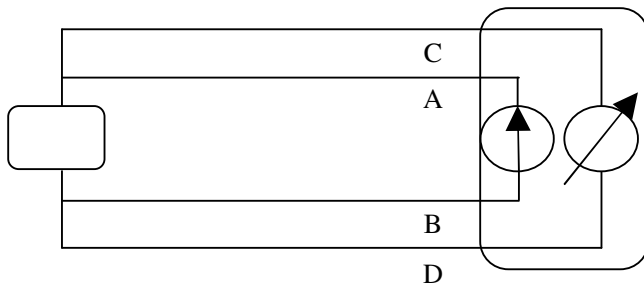


Figura 10: Conexão a quatro fios

Fonte: Bega *et al.*, 2011

2.3.2 Pressão

Pressão é uma grandeza derivada do Sistema Internacional de Unidades (SI).

Pressão é definida como a ação de uma força sobre uma área, conforme expressa a Eq. (4):

$$\text{Pressão} \quad (P) = \frac{\text{Força } (F)}{\text{Área } (A)} \quad (4)$$

Para medir a pressão, necessita-se de um valor referencial. Dependendo da especificidade, a pressão medida pode ser: pressão absoluta, pressão manométrica, vácuo e pressão diferencial.

O objetivo de medir pressão geralmente resulta da necessidade de controlar ou monitorar processos (e.g.: segurança, controle de qualidade, balanço de massa).

Neste estudo, o objetivo é garantir que as medições de pressão (e temperatura) entre dois ciclos de calibrações sejam confiáveis. Se a periodicidade for muito grande (muito extensa), pode comprometer a confiabilidade metrológica e, se muita pequena, aumentar custos de verificação e calibração.

A pressão pode ser expressa em termos absolutos ou relativos (Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia, 2010):

- Pressão absoluta (*Pabs*): “é a pressão que está acima da pressão do zero absoluto”
- Pressão manométrica (relativa ou positiva): “é um caso especial de medição de pressão diferencial quando a pressão absoluta medida for maior que a pressão atmosférica local. A pressão manométrica avalia o quanto seu valor está acima da pressão atmosférica local”.
- Vácuo (pressão negativa): “Vácuo é um caso especial de medição de pressão diferencial quando a pressão absoluta medida for menor que a pressão atmosférica local. Vácuo avalia o quanto a pressão está abaixo da pressão atmosférica local”.
- Pressão diferencial: “A diferença entre duas pressões p_1 e p_2 é denominada pressão diferencial. Nesta modalidade de pressão o valor da pressão referencial, p_1 ou p_2 , não é a pressão atmosférica local como também não é a pressão zero absoluto”.

Quando conectados a uma fonte de alimentação adequada, os transmissores de pressão fornecem um sinal elétrico de 4 a 20 mA, que varia conforme as mudanças de pressão. (Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia, 2010).

Um sistema de medição de pressão é composto por dois elementos: um primário e um secundário. O elemento primário fica em contato direto ou indireto com a região na qual se verificam mudanças de pressão, enquanto que o elemento secundário (transmissor de pressão) converte esta alteração em valores mensuráveis para serem utilizados em indicação, controle e monitoração (Cassiolato, 2010).

Alguns sensores são mais utilizados na medição de pressão, tais como: capacitância variável (capacitivos), piezo-resistivo (*strain gage*), potenciométrico piezo-elétrico, relutância variável, ressonante, ótico etc.

2.3.2.1 **Sensores Capacitivos**

Sensores capacitivos são utilizados na medição de várias grandezas físicas, a exemplo das medições de deslocamento, velocidade, aceleração linear ou angular

de um objeto; a unidade concentração de gases refere-se ao nível de líquidos ou sólidos; força, torque, pressão e temperatura.

Destacam-se algumas características relevantes de um transmissor de pressão inteligente: sinal digital de saída, interface de comunicação digital, compensação de pressão, compensação de temperatura, estabilidade, facilidade de instalação e calibração, alta confiabilidade, baixos custos de instalação e manutenção, trava física para transferência de custódia. (Cassiolato, 2010). Baseados nestas características os sensores capacitivos são considerados mais confiáveis.

Assim, é importante ressaltar que a relação entre entrada e saída de um transmissor de pressão deve ser linear podendo ser expressa pela Eq. (5):

$$Y = ax + b \quad (5)$$

Nesta expressão, a denota o ganho, e b o offset (Cassiolato, 2010).

No que concerne às características estáticas dos sensores, alguns conceitos são utilizados: intervalo de variação (**range**), que é a faixa de medição específica, ou seja, os valores mínimos e máximos que o transmissor pode medir, o **zero** é o valor mínimo que um transmissor calibrado pode medir e o **span ou faixa calibrada** (faixa de trabalho associada à calibração), figura 11 (Cassiolato, 2010).

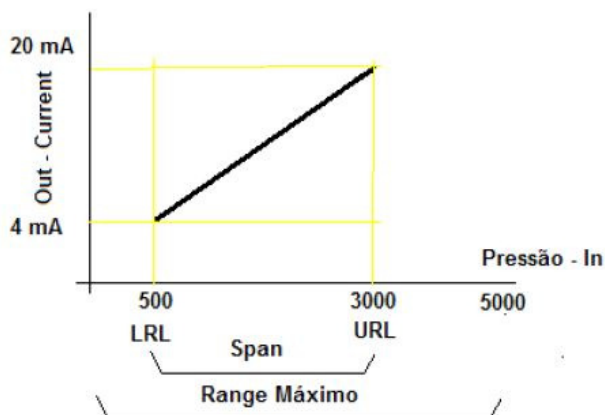


Figura 11: Terminologia de Calibração

Fonte: Cassiolato, 2010.

2.4 Procedimentos de calibração

Esta seção descreve os tipos de calibrações e procedimentos utilizados nos transmissores de temperatura e pressão estática em malha de gás natural.

Essencialmente, uma calibração se faz necessária quando se deseja comprovar e garantir metrologicamente os resultados das medições de instrumentos ou de sistemas de medição (Albertazzi e Sousa, 2008).

Para os medidores discutidos neste trabalho, os métodos de calibração utilizados são: calibração direta e calibração indireta.

- **Calibração direta** é quando a medida materializada é diretamente aplicada sobre o sistema de medição a calibrar. Como exemplo, tem-se a calibração de uma balança, onde a massa padrão é colocada sobre a mesma (Albertazzi e Sousa, 2008).
- **Calibração indireta** é utilizada quando não é possível a materialização da medida ou em casos onde não se faz prático utilizá-las. Neste caso, a medição auxiliar é a referência. Sendo assim o sistema de medição a calibrar e o sistema de medição auxiliar são comparados, como exemplo, pode-se citar o velocímetro de um veículo (Albertazzi e Sousa, 2008).

Os instrumentos de temperatura e pressão estática deverão ser calibrados juntamente com os respectivos sensores, por exemplo: transmissor de pressão junto com o seu elemento primário e transmissor de temperatura junto com o sensor de termoresistência ou termopar, quando necessário.

Ao calibrar instrumentos de temperatura, deverão ser observadas a sua uniformidade e estabilidade térmica não apenas do local onde os sensores serão calibrados como, também, o padrão de referência aplicável.

Uma boa prática metrológica é que as calibrações sejam realizadas nos pontos correspondentes a 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da faixa de utilização dos instrumentos, com quatro leituras em cada ponto, sendo duas em ciclo ascendente e duas em ciclo descendente.

O procedimento de calibração fundamenta-se nos dados referentes à aprovação inicial ou “*as found*” de um instrumento, que são os dados antes do ajuste e aprovação final ou “*as left*” de um instrumento, que são os dados após os ajustes.