

3 Desenvolvimento Experimental

O presente capítulo descreve o trabalho experimental desenvolvido com os seguintes propósitos:

- a) Avaliar o desempenho (erro relativo e repetitividade) do medidor ultra-sônico submetido a diferentes sistemas de calibração;
- b) Verificar o atendimento dos requisitos de instalação para medidores ultra-sônicos em laboratórios acreditados pelo INMETRO e,
- c) Verificar os fatores de influência nos medidores ultra-sônicos pelo método de tempo de trânsito.

Para atender os propósitos do presente estudo, foram utilizados dois medidores ultra-sônicos para medição de vazão que operam pelo método de tempo de trânsito, ambos de propriedade da Petrobras. Estes medidores foram instalados em dois sistemas distintos de calibração, pertencentes, respectivamente, a dois laboratórios acreditados pelo INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial) e pertencentes a RBC (Rede Brasileira de Calibração) para atuarem na área de vazão, ambos operando em conformidade com as especificações técnicas de instalação do fabricante e segundo os requisitos mínimos especificados em normas e recomendações internacionais aplicáveis [14], [11], [12] e [13].

3.1 Metodologia da pesquisa

Como procedimento metodológico do trabalho desenvolvido, calibrações dos medidores referenciados foram realizadas segundo os métodos detalhados no item 3.4 deste Capítulo.

Para manter a aderência às recomendações das normas aplicáveis, experimentos foram conduzidos observando-se as diferentes condições de escoamento, a seguir caracterizadas:

- a) Perturbação no escoamento devido à existência de componentes transversais nos trechos retos de medição;
- b) Escoamento pulsante;

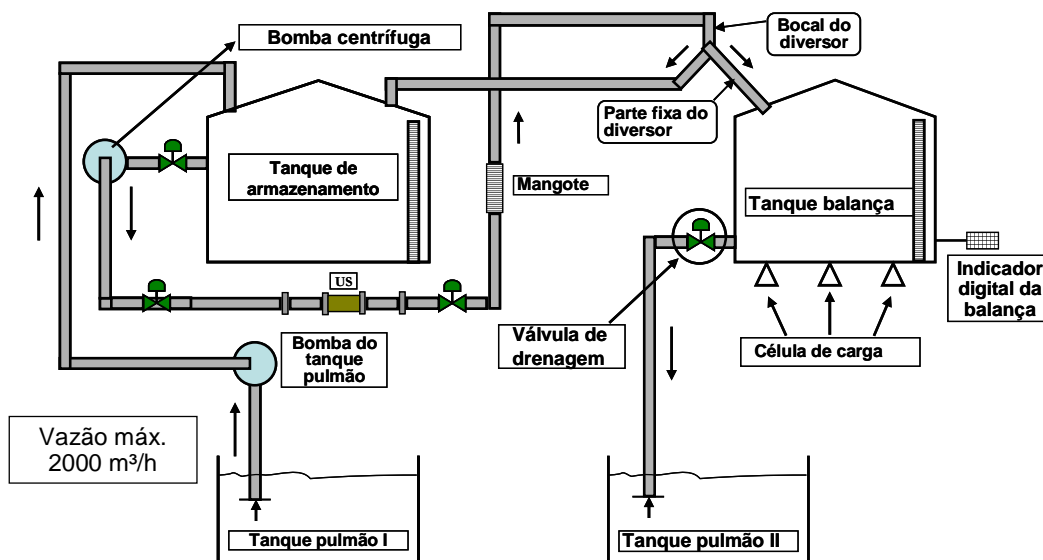
- c) Variação na vazão durante a corrida de calibração, superior a 10% da vazão de operação, causando instabilidade no escoamento;

3.2 Sistemas de calibração

As Fig. 29 e 30 ilustram os sistemas de calibração dos dois laboratórios acreditados (**Laboratório A** e **Laboratório B**)⁷ que aceitaram participar da pesquisa. Em ambos os casos os tanques são do tipo aberto, isto é, operam a pressão atmosférica. Os instrumentos secundários (auxiliares), utilizados para medição de temperatura, pressão e densidade não fazem parte do objetivo de pesquisa deste trabalho, embora façam parte dos sistemas de calibração dos laboratórios e tenham sido utilizados para correção ou cálculo do volume. Nos dois laboratórios participantes estes instrumentos atendiam aos requisitos da tabela 4 da OIML R-117 [5].

A Fig. 29, referente ao **Laboratório A**, ilustra o sistema de calibração utilizado, que faz uso de um tanque provador gravimétrico com divisor como padrão primário de referência.

Nesse laboratório, experimentos de calibração foram conduzidos em dois circuitos distintos, a seguir caracterizados:



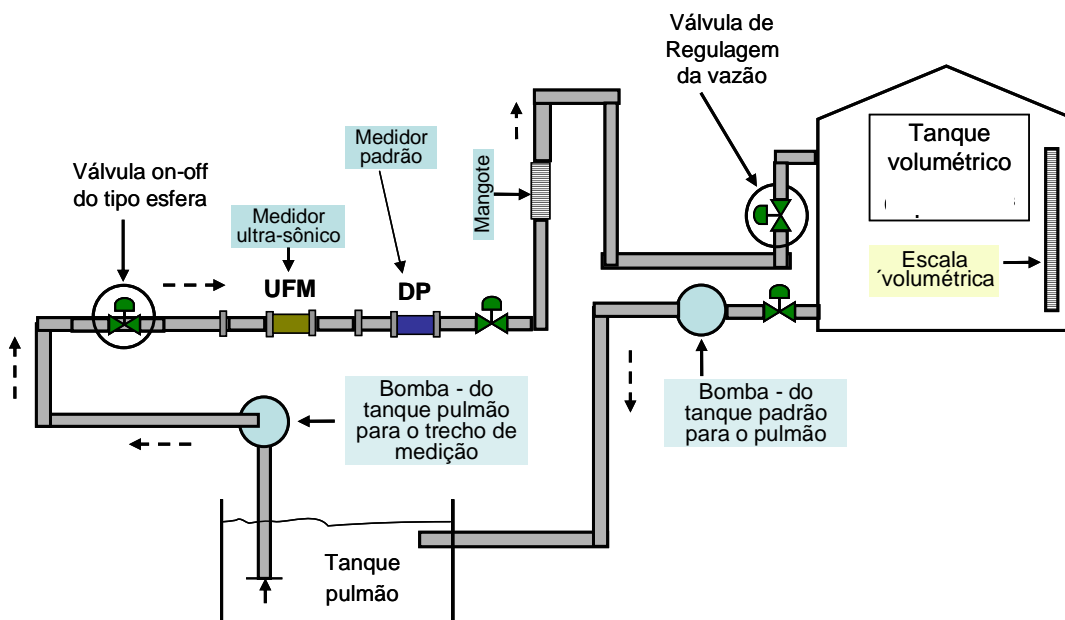
⁷Por acordo de confidencialidade mantido entre as partes envolvidas na pesquisa, os nomes dos laboratórios participantes da pesquisa (aqui denominados Laboratório A e laboratório B), não são revelados.

Figura 29 — Sistema de calibração do Laboratório A

Circuito-1 - situação em que o medidor objeto da calibração foi instalado à jusante de um trecho de tubo reto com 40 diâmetros nominais (DN) em relação ao medidor com DN=100 mm. Um retificador de fluxo foi instalado à montante do medidor a uma distância de 1000 mm (10 DN), conforme especificação mínima descrita em [14] e [13].

Circuito-2 — situação em que o medidor objeto da calibração foi instalado à jusante de um trecho de tubo reto com 10 diâmetros nominais (DN) em relação ao medidor com DN=100 mm. Um retificador de fluxo foi instalado à montante do medidor a uma distância de 1000 mm (10 DN), conforme especificação mínima descrita em [14] e [13]. Este circuito é dotado de uma derivação à 90° do tubo de medição, no mesmo plano horizontal, com uma válvula do tipo esfera instalada à montante do trecho reto de medição para operar com a função *on-off*.

A Fig. 30, referente ao **Laboratório B**, ilustra o circuito de calibração utilizado, que faz uso de um tanque provador volumétrico com capacidade máxima de 6000 litros como padrão primário de referência e um medidor padrão volumétrico do tipo deslocamento positivo⁸.

**Figura 30** — Sistema de calibração do Laboratório B

⁸ Os princípios de operação deste medidor são descritos no Apêndice A.

3.3 Características do medidor calibrado

Para o presente estudo foram utilizados dois medidores ultra-sônicos do tipo tempo de trânsito, com as seguintes características:

- Um medidor ultra-sônico com diâmetro nominal de 100 mm (DN=4”), com cinco pares de transdutores, modelo *Altosonic V*, do fabricante Krohne. As características de desempenho metrológico que foram avaliadas neste estudo para este medidor e que podem ser obtidas no catálogo do fabricante são:
 - Classe de exatidão: $\pm 0,15\%$ do valor medido (velocidades $\geq 0,5$ m/s).
 - Repetitividade: 0,04%.

- Um outro medidor ultra-sônico com diâmetro nominal de 200 mm (DN=8”), com dois pares de transdutores, modelo UFM-500, do mesmo fabricante. As características de desempenho metrológico que foram avaliadas neste estudo para este medidor e que podem ser obtidas no catálogo do fabricante são:
 - Classe de exatidão: $\pm 0,50\%$ do valor medido (velocidades $\geq 0,5$ m/s).
 - Repetitividade: 0,10%.

3.4 Métodos de calibração e de determinação dos resultados

Em conformidade com os propósitos desta pesquisa, foram avaliados os erros relativos na calibração do medidor, bem como a repetitividade entre calibrações, visando comparar as especificações descritas pelo fabricante e os requisitos da Recomendação OIML R-117. Nos dois laboratórios foram utilizados os seguintes métodos de cálculo para determinação dos erros relativos e da repetitividade, com base na recomendação normativa citada neste texto:

- Erro % = $\frac{\text{Volume totalizado no medidor} - \text{Volume totalizado no padrão}}{\text{Volume totalizado no padrão}} \times 100$

- Repetitividade (%) = Maior valor de erro (%) — menor valor de erro (%)

A fim de avaliar os fatores de influência na medição ultra-sônica, foram realizadas calibrações nos dois laboratórios, conforme metodologia apresentada a seguir.

3.4.1 Procedimento Experimental utilizado pelo Laboratório A

Tem como objetivo avaliar os efeitos causados pelos fatores que afetam a exatidão e a repetitividade e comprová-los experimentalmente. Estes sistemas ou métodos foram denominados de Método-1 e Método-2.

Método-1: este método reúne as melhores condições de calibração realizadas pelo **Laboratório A**, pois neste encontram-se a disposição no circuito um espaço suficiente para instalação de tubos retos de até 100 diâmetros nominais à montante do trecho de medição, a depender do diâmetro nominal do medidor. O ensaio realizado por meio deste método foi classificado como Condição de Calibração C1T1. Este ensaio conta com as seguintes características:

- a) O uso de um trecho de tubo reto com 40 diâmetros nominais ($\cong 4000$ mm) à montante do trecho de medição;
- b) Conta com um volume provado de 15.000 litros (15 m^3);
- c) Dispõe de um diversor que tem a função de direcionar o fluido do tanque reservatório para o tanque provador, após a estabilização da vazão⁹.

Método-2: este método foi adotado para reproduzir as condições de instalação do **Laboratório B**. Para isso foram realizados quatro ensaios distintos e que as suas premissas estão caracterizadas no item 3.4.1.1 deste Capítulo.

No **Laboratório A**, os ensaios foram realizados numa vazão máxima de $167 \text{ m}^3/\text{h}$ para o Método-1 e de $80 \text{ m}^3/\text{h}$ para os ensaios do Método-2. A vazão máxima neste último método estava limitada pelo dimensionamento do circuito de calibração (**Circuito 2**).

3.4.1.1 Descrição dos Métodos realizados pelo Laboratório A

Para o Método-1, que utilizou o Circuito-1, foi adotada a Condição de Calibração C1T1, que consistiu em iniciar uma corrida de calibração fazendo o fluido escoar num sistema fechado¹⁰ de tal forma a se estabelecer um regime de escoamento permanente, isto é, vazão estabilizada. Após o fluido entrar nesse

⁹ Vazão estabilizada: vazão que varia, no máximo, de $\pm 10\%$ da vazão nominal, conforme o API MPMS 5.8 - *Measurement of Liquid Hydrocarbons by Ultrasonic Flow Meters Using Transit Time Technology*

¹⁰ Sistema fechado: sistema em que permite que o fluido que sai de um tanque e passa por

regime é acionado um diversor que direciona o fluido do tanque reservatório para o tanque provador pelo sistema gravimétrico. Conhecendo-se a massa do fluido (água) no tanque e a massa específica deste fluido, determina-se o volume de fluido no tanque. As temperaturas do fluido no tanque, do fluido no medidor ultra-sônico e a ambiente são registradas durante cada corrida. Estes registros foram importantes para que o volume totalizado no tanque seja corrigido para as condições do medidor ultra-sônico.

Para o Método-2, utilizando o Circuito-2, foram adotadas as seguintes premissas:

Condição de Calibração C2T1:

- a) Volume totalizado igual a 15.000 litros (15 m^3);
- b) Totalização¹¹ após estabilização da vazão (regime permanente);
- c) Utilização do diversor para início da totalização do volume.

Condição de Calibração C2T2:

- a) Volume totalizado igual a 15.000 litros (15 m^3);
- b) Utilização de válvula on-off para início e final de corrida de calibração;
- c) Esta válvula fica localizada imediatamente a montante do trecho de medição;
- d) Totalização desde o início de abertura da válvula (regime transiente);
- e) Não foi utilizado diversor para início da totalização do volume.

Condição de Calibração C2T3:

- a) Volume totalizado igual a 5 m^3 ;
- b) Utilização de válvula *on-off* para início e final de corrida de calibração;
- c) Esta válvula fica localizada imediatamente a montante do trecho de medição;
- d) Totalização desde o início de abertura da válvula (regime transiente).

Condição de Calibração C2T4:

- a) Volume totalizado igual a 5 m^3 ;

¹¹ Representa o somatório do volume de líquido, do início ao fim de uma corrida de calibração, contabilizado no padrão (tanque ou medidor) e no medidor objeto da calibração.

- b) Totalização após estabilização da vazão (regime permanente);
- c) Utilização do diversor para início da totalização do volume.

Os recursos (medidor, padrão, fluido de calibração) bem como os procedimentos para determinação dos volumes na calibração do medidor ultra-sônico estão listados a seguir:

- a) Medidor utilizado: medidor ultra-sônico multi-trajetória, do tipo tempo de trânsito, com diâmetro nominal de 100 mm (DN 4”).
- b) Padrão utilizado: Foi utilizado o princípio de totalização volumétrica por tanque provador pelo método gravimétrico com diversor;
- c) Fluido: água
- d) Determinação do volume no tanque: Conhecendo-se a massa de líquido (água) no tanque e sua massa específica, calcula-se o volume de líquido no tanque;
- e) Determinação do volume totalizado no medidor: É obtido através da totalização de pulsos no momento em que é acionado o diversor até o final da corrida.

3.4.1.2

Objetivos dos ensaios realizados pelo Laboratório A

A tabela 2 apresenta um resumo dos objetivos dos ensaios realizados no **Laboratório A**.

Tabela 2 — Objetivos dos testes realizados pelo Método-1 e pelo Método-2 no Laboratório A

Método	Condição de calibração	Objetivos
1	C1T1	<ul style="list-style-type: none"> a) Avaliar o efeito da ausência de transiente de vazão, considerando que cada corrida de calibração é iniciada com fluxo em regime permanente. b) Avaliar a utilização de 40 DN de tubo reto à montante do medidor; c) Avaliar o efeito do volume provado (15 m³).
2	C2T1	<ul style="list-style-type: none"> a) Avaliar o efeito da ausência de transiente de vazão, considerando que cada corrida de calibração é iniciada com fluxo em regime permanente; b) Avaliar a utilização de 10 DN de tubo reto à montante do medidor; c) Avaliar o efeito do volume provado (15 m³).
2	C2T2	<ul style="list-style-type: none"> a) Avaliar o efeito do transiente de vazão, considerando que cada corrida de calibração é iniciada com o fluido em repouso, abrindo-se uma válvula à montante do medidor, e termina com o fechamento desta mesma válvula; b) Avaliar a utilização de 10 DN de tubo reto à montante do medidor; c) Avaliar o efeito do volume provado (15 m³).
2	C2T3	<ul style="list-style-type: none"> a) Avaliar o efeito do transiente de vazão, considerando que cada corrida de calibração é iniciada com o fluido em repouso, abrindo-se uma válvula à montante do medidor, e termina com o fechamento desta mesma válvula; b) Avaliar a utilização de 10 DN de tubo reto à montante do medidor; c) Avaliar o efeito do volume provado (5 m³).
2	C2T4	<ul style="list-style-type: none"> a) Avaliar o efeito da ausência de transiente de vazão, considerando que cada corrida de calibração é iniciada com o escoamento em regime permanente. b) Avaliar a utilização de 10 DN de tubo reto à montante do medidor; c) Avaliar o efeito do volume provado (5 m³).

3.4.1.3

Faixa de vazão calibrada nos Métodos realizados pelo Laboratório A

Para realização de cada método de calibração, foram selecionadas as seguintes condições, caracterizadas na tabela 3:

Tabela 3 — Condições dos ensaios no Laboratório A

Ensaio	Método	Vazão (m ³ /h)	Volume totalizado (m ³)	Nº de corridas por vazão
C1T1	1	30	15	3
C1T1	1	80	15	3
C1T1	1	167	15	3
C2T1	2	30	15	3
C2T1	2	40	15	3
C2T1	2	60	15	3
C2T1	2	80	15	3
C2T2	2	30	15	3
C2T2	2	60	15	3
C2T2	2	80	15	5
C2T3	2	30	5	3
C2T3	2	40	5	3
C2T3	2	60	5	3
C2T3	2	80	5	3
C2T4	2	30	5	3
C2T4	2	40	5	3
C2T4	2	60	5	3
C2T4	2	80	5	3

3.4.2

Procedimento Experimental utilizado pelo Laboratório B

Com os mesmos propósitos de avaliação dos efeitos causados na exatidão e na repetitividade de calibração de medidores ultra-sônicos pelos fatores descritos no Capítulo 2 do presente trabalho, foram utilizados dois sistemas distintos no **Laboratório B**. O primeiro, um sistema de calibração do tipo tanque provador (*tank prover*), que foi denominado Método-3, e o segundo, do tipo medidor padrão (*master meter*), que foi denominado Método-4.

3.4.3

Descrição dos Métodos realizados pelo Laboratório B

Para o Método-3 foi utilizado como padrão um tanque provador com capacidade de 5000 litros (5 m³), contendo água como fluido de calibração. O

medidor calibrado por este método foi o ultra-sônico de DN=100 mm, conforme características descritas no item 3.3 deste Capítulo. O sistema de calibração foi caracterizado por ser constituído de:

- a) Um tanque reservatório;
- b) Um tanque padrão certificado pelo INMETRO;
- c) Um conjunto de bombas para fazer escoar o fluido do tanque reservatório para o tanque padrão;
- d) Trecho reto de tubulação suficiente para atender aos requisitos mínimos do fabricante e das normas aplicáveis;
- e) Válvula esfera do tipo *on-off* para início e término de uma corrida de calibração, localizada a montante do trecho de medição;
- f) Válvula reguladora de vazão, localizada a jusante do trecho de medição;
- g) Transmissor de temperatura no tanque padrão;
- h) Transmissor de temperatura na linha, onde o medidor fica instalado.

Para execução do Método-3, com base na vazão selecionada, foram utilizadas as bombas de transferência que faziam o fluido escoar do tanque reservatório para o tanque padrão, passando pelo medidor em calibração. O início da corrida de calibração se dá após a abertura de uma válvula esfera com a função de início e término de um ensaio de calibração. Durante estes ensaios, são feitas leituras de temperatura na linha e no tanque padrão no início e término de um ensaio para que sejam feitas as devidas correções de volume para a condição de referência¹². Os ensaios foram realizados em quatro vazões, 30 m³/h, 83 m³/h, 120 m³/h e 150 m³/h, e com o mínimo de cinco corridas cada. Este método se caracteriza por ser um sistema fechado, isto é, o volume provado nominal neste teste foi de 5 m³ em todas as corridas.

Para o Método-4 foi utilizado um sistema de calibração contendo óleo mineral¹³ como fluido de calibração. Neste método, o sistema de calibração adotado foi do tipo *master meter*, utilizado-se um medidor padrão de deslocamento positivo do tipo lóbulos, com classe de exatidão $\pm 0,15\%$, instalado à jusante do medidor a ser calibrado, conforme ilustra a Fig. 30. O medidor calibrado por este método foi o ultra-sônico de DN=200 mm, conforme

¹² Em condições de pressão atmosférica (101,325 kPa) e de temperatura à 20 °C.

¹³ Especificação do óleo: *Spindura 10* da Cia de lubrificantes Castrol.

características descritas no item 3.3 deste Capítulo. Para acompanhamento da calibração por este método, além dos recursos já citados, foram utilizados um computador de vazão, modelo S-600, fabricante *Emerson Process* e um *lap top*, com o programa *Intoch* para monitoramento em tempo real dos eventos de calibração.

Para execução do Método-4, com base na vazão selecionada, foram utilizadas as bombas de transferência que faziam o fluido escoar do tanque reservatório passando pelo medidor em calibração e o medidor padrão e seguindo para um tanque provador com capacidade de 6 m³. O início de cada corrida de calibração se deu após a abertura da válvula esfera com função *on-off*. Durante o ensaio, foram feitas leituras de temperatura na linha e no tanque padrão, no início e no término de cada corrida para que fossem feitas as devidas correções de volume para a condição de referência. Os ensaios foram realizados em três vazões distintas (300 m³/h, 400 m³/h e 500 m³/h).

No Capítulo 4 do presente estudo são apresentados os resultados de cada ensaio realizado, bem como as análises decorrentes destes.