

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Este capítulo descreve os fundamentos básicos da medição de vazão de gás em condutos fechados, tipos de medidores utilizados na medição desta grandeza e sistemas de comprovação metrológica (sistemas de calibração) utilizados para garantir a confiabilidade metrológica.

2.1 Norma NBR ISO 9951

Esta Norma tem por objetivo especificar as dimensões, faixas de operação, construção, desempenho, calibração e características de saída de medidores tipo turbina para medição de vazão de gás.

Também trata das condições de instalação, ensaio de vazamento e ensaio de pressão, incluindo recomendações para uso, verificações de campo e perturbações de escoamento.

Com o intuito de obter uma maior igualdade nos modelos fabricados pelas empresas fornecedoras de turbinas, são definidas as características construtivas do medidor, alertando aos fabricantes o cuidado que se deve ter na hora de definir o corpo do medidor, o mecanismo interno, carcaça do medidor, conexões, comprimento, dimensões e tomadas de pressão, assim como outros fatores que auxiliem no processo de identificação e controle do equipamento.

Levando em consideração que não estamos preocupados em relatar o processo de fabricação e sim a característica de desempenho, iremos explorar a Norma neste contexto.

Geralmente é desejável saber a quantidade de gás em termos de massa ou em termos de volume, em certas condições. Em todos os casos essa quantidade é derivada da medição de volume, levando-se em consideração a leitura do medidor nas condições de medição. Deste modo, para ser realizada uma medição de volume, torna-se necessário definir os seguintes conceitos desta Norma:

Condições de medição - Condições do gás (por exemplo, pressão e temperatura) no ponto de medição.

Condições de base - Condições para as quais o volume de gás medido é convertido (por exemplo, temperatura de base e pressão de base).

Erro Relativo (E) - Em termos percentuais, é definido como sendo a razão da diferença entre o valor indicado V_m e o valor verdadeiro convencional V_s do volume que passa pelo medidor durante o ensaio, dividido pelo valor verdadeiro convencional V_s :

$$E = (V_m - V_s) / V_s \quad (14)$$

Todos os medidores devem ter um erro máximo admissível de $\pm 1\%$ da faixa de vazão nominal. Quando a vazão mínima Q_{\min} for menor que $0,2 Q_{\max}$, o erro máximo permitido entre Q_{\min} e $0,2 Q_{\max}$ é de $\pm 2\%$.

É considerado que o medidor satisfaz este requisito quando atendê-lo em todas as vazões especificadas nos Dados de Calibração.

Calibração - Deve ser feita individualmente. O resultado da calibração deve estar disponível quando solicitado, juntamente com um relato das condições sob as quais a calibração foi realizada.

Dados de calibração - Os dados de calibração fornecidos devem conter:

- a) o erro em Q_{\min} e nas seguintes vazões acima de Q_{\min} : 0,1; 0,25; 0,4; 0,7 de Q_{\max} e Q_{\min} ;
- b) o nome e localização da bancada de calibração;
- c) o método de calibração;
- d) a incerteza estimada do método;
- e) a natureza e condições (pressão e temperatura) do gás de ensaio;
- f) a posição do medidor (horizontal, vertical fluxo ascendente, vertical fluxo descendente).

Condições de calibração – A calibração deve preferencialmente ser conduzida em condições mais próximas possíveis das condições de operação.

Bancada de calibração – A bancada de calibração na qual a calibração é conduzida deve ser rastreável a padrões primários de massa, comprimento, tempo e temperatura.

Saída e Indicador – A saída do medidor consiste em um totalizador elétrico ou mecânico totalizando a saída do medidor. Um trem de pulsos elétrico ou rotativo pode ser usado para representar a vazão através do medidor.

Equações para cálculo do volume

Como o medidor de turbina mede volume nas condições de medição, a equação de estado dos gases ideais pode ser aplicada para converter o volume indicado para as condições de base, quando estas condições são constantes.

As equações seguintes convertem o volume de gás indicado por um medidor tipo turbina das condições de medição em volume de gás para as condições de base (pressão e temperatura de base):

para as condições de medição

$$P_m \times V_m = Z_m \times N \times R \times T_m \quad (15)$$

E para as condições de base

$$P_b \times V_b = Z_b \times N \times R \times T_b \quad (16)$$

Sendo R a constante universal dos gases que não depende da pressão e da temperatura, para um número de moles N do gás, as duas equações podem ser combinadas para fornecer:

$$V_b = V_m \times \left(\frac{P_m}{P_b} \right) \times \left(\frac{T_b}{T_m} \right) \times \left(\frac{Z_b}{Z_m} \right) \quad (17)$$

A Eq. (17) pode ser usada para as condições específicas do medidor.

Para condições de medição não constantes:

$$V_b = \int q_m \times \left(\frac{P_m}{P_b} \right) \times \left(\frac{T_b}{T_m} \right) \times \left(\frac{Z_b}{Z_m} \right) \times dt \quad (18)$$

2.2 Norma NBR 14801

Esta Norma complementa a NBR ISO 9951 quanto à classificação, ensaios complementares para aprovação e ensaios de recebimento para medidores tipo turbina para medição de vazão de gás.

O medidor deve ser classificado conforme sua designação e faixa de medição, de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 : Classificação dos medidores

Designação do medidor ¹⁾	Q _{máx} m ³ /h	Faixa de medição			
		1:10	1:20	1:30	1:50
		Q _{min} m ³ /h			
(G)					
16	25	2,5	1,3	0,8	0,5
25	40	4,0	2,0	1,3	0,8
40	65	6,0	3,0	2,0	1,3
65	100	10,0	5,0	3,0	2,0
100	160	16,0	8,0	5,0	3,0
160 ²⁾	250	25,0	13,0	8,0	5,0
250 ²⁾	400	40,0	20,0	13,0	8,0
400 ²⁾	650	65,0	32,0	20,0	13,0
650 ²⁾	1000	100,0	50,0	32,0	20,0
1000 ²⁾	1600	160,0	80,0	50,0	32,0

¹⁾ A designação G pode ser usada como referência nominal.
²⁾ São aceitos medidores de designação igual a múltiplos decimais.

A bancada utilizada para avaliar o medidor deve possuir as seguintes características:

Dispositivo de medição de pressão – Devem ser usados manômetros que possibilitem leituras de pressão com incerteza menor que 1% do valor medido.

Dispositivo de medição de tempo – Devem ser usados dispositivos que possibilitem leitura de tempo com incerteza menor que 0,2% do valor medido e resolução mínima de 0,2s.

Dispositivo de medição de temperatura – Devem ser utilizados termômetros que possibilitem leitura com incerteza menor que 0,2 °C.

Bancada de calibração – A bancada utilizada deve permitir que os resultados dos ensaios de calibração executados de acordo com as recomendações desta Norma possuam incerteza total não superior a 0,5%.

Para não relatar todos os ensaios complementares para aprovação de modelo, mencionou-se somente as informações que contemplam a calibração.

Ensaio de desempenho – Os medidores devem ser calibrados nas vazões Q_{\min} , 0,1 de Q_{\max} , 0,25 de Q_{\max} , 0,4 de Q_{\max} , 0,7 de Q_{\max} , e Q_{\max} , com três repetições, sendo que a média aritmética dos erros obtidos em cada vazão não deve superar os valores especificados em [2].

Ensaio de repetitividade – O ensaio deve ser realizado no ponto correspondente a $0,2Q_{\max}$. São executadas cinco medições sucessivas e, caso uma delas seja discrepante em relação às demais, desprezam-se todas e se faz nova série de medições em igual número. O cálculo de dispersão dos resultados é realizado de acordo com as seguintes equações:

$$r = t_{95} \times s \leq \pm 0,20$$

onde:

$$t(\text{student}) \text{ para } 5 \text{ pontos, } t_{95} = 2,776$$

s = Desvio padrão

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (19)$$

2.3 Portaria nº 114 de 16 de outubro de 1997

O presente Regulamento estabelece as condições mínimas a que devem satisfazer os medidores tipo rotativo e tipo turbina utilizados nas medições de gases.

Uma introdução a esta Portaria [4] foi apresentada no item 1.2.3. Vejamos agora algumas definições deste regulamento:

Medidor tipo rotativo: Medidores nos quais as paredes internas que definem as câmaras medidoras entram em rotação e o volume de gás escoado é função do número de revoluções dessas paredes.

Medidores tipo turbina: Medidores nos quais o escoamento do gás coloca em movimento um rotor e volume do gás escoado é função do número de revoluções desse rotor.

Vazão (Q): Volume do gás que escoa através do medidor por unidade de tempo, expresso em metros cúbicos por hora.

Vazão mínima ($Q_{\text{mín}}$): Vazão acima da qual todo medidor deve permanecer dentro dos erros máximos admissíveis, expressa em metro cúbico por hora.

Vazão máxima ($Q_{\text{máx}}$): Maior vazão na qual o medidor deve operar permanecendo dentro dos erros e perda de pressão máxima admissíveis, expressa em metros cúbicos por hora.

Pressão máxima de trabalho ($P_{\text{máx}}$): Máxima pressão a que pode ser submetido o medidor em trabalho contínuo, sem que ocorram alterações em suas características construtivas e metrológicas.

Erro admissível: Erro máximo que o medidor pode indicar quando operando dentro da faixa de vazões de trabalho.

Designação do medidor (G): Convenção que designa a capacidade do medidor.

Faixa de vazões de trabalho: Valores compreendidos entre as vazões máximas e mínimas correspondentes aos medidores de gases conforme mostrado na Tabela 1.

Condição de operação: Condição de temperatura e pressão em que se encontra o gás a ser medido.

Condição Base: Condição de referência para a qual deve ser convertida a leitura de volume. A condição base de temperatura deve ser 20°C e a condição base de pressão deve ser 101325Pa.

Erro de medição: Ver Erro relativo em 2.1

Levando em consideração que não estamos preocupados em relatar o processo de fabricação e sim as Exigências Metrológicas e a característica de desempenho, explorou-se a Portaria dentro deste contexto.

Exigências Metrológicas

Nenhum medidor de gás abrangido por esta Portaria poderá ser utilizado, comercializado ou posto a venda, sem ter sido seu modelo aprovado, bem como sem ter sido aprovado em verificação inicial.

O fabricante deverá colocar à disposição do Órgão Metrológico competente executor das verificações, meios adequados para a realização dos ensaios, caso os ensaios de verificação inicial sejam executados nas instalações do fabricante ou por ele indicadas. Em ambos os casos tais instalações do fabricante devem ser previamente aprovadas para uso previsto.

Os medidores devem manter seus erros de indicação segundo a Tabela 3.

Tabela 3 : Erros máximos admissíveis

Vazão Q me/h	Erros Máximos Admissíveis	
	em verificação inicial	em serviço
$Q_{\text{mím}} \leq Q < Q_t$	$\pm 2\%$	$\pm 3\%$
$Q_t \leq Q \leq Q_{\text{máx}}$	$\pm 1\%$	$\pm 1,5\%$

Os valores da vazão de transição Q_t são os constantes na Tabela 4.

Tabela 4 : Vazão de transição

Faixa de Medição	Q_t
1:10	$0,20 Q_{m\acute{a}x}$
1:20	$0,20 Q_{m\acute{a}x}$
1:30	$0,15 Q_{m\acute{a}x}$
1:50	$0,10 Q_{m\acute{a}x}$

Ensaio de desempenho

Os erros para cada modelo devem ser determinados pelo menos nas seguintes vazões:

- para medidores com faixa de medição 1:10 e 1:30; em $Q_{m\acute{i}n}$, $0,05Q_{m\acute{a}x}$ e $0,1Q_{m\acute{a}x}$, se estes últimos valores forem superiores a $Q_{m\acute{i}n}$, $0,25Q_{m\acute{a}x}$, $0,40Q_{m\acute{a}x}$, $0,70Q_{m\acute{a}x}$ e $Q_{m\acute{a}x}$.
- Para medidores com faixa de medição 1:50, em $Q_{m\acute{i}n}$, $0,05Q_{m\acute{a}x}$, $0,15Q_{m\acute{a}x}$, $0,25Q_{m\acute{a}x}$, $0,70Q_{m\acute{a}x}$ e $Q_{m\acute{a}x}$.
- O ensaio deve ser repetido três vezes sendo considerada a média das determinações.

Se os ensaios forem efetuados em outras vazões, as garantias devem ser pelo menos equivalentes àquelas obtidas pelo ensaio acima.

Para as vazões compreendidas entre $0,4Q_{m\acute{a}x}$ e $Q_{m\acute{a}x}$, o desvio entre o máximo e o mínimo da curva de erro em função da vazão não deve ser superior, para cada um dos medidores, a 1 %.

Ensaio de repetitividade

Para teste de repetitividade o ensaio deve ser realizado no ponto correspondente a $0,2Q_{m\acute{a}x}$. São executados 5 medições sucessivas e caso uma delas seja discrepante em relação as demais, desprezam-se todas e se faz nova série de medições em igual número. O calculo de dispersão dos resultados será conforme Eq. 6 definida no ensaio de repetitividade de [2].

2.4 Medidores tipo Turbina

Estes medidores são classificados como medidores do tipo Velocimétrico. Basicamente, seu princípio de funcionamento pode ser entendido da seguinte maneira: possui um rotor, cujas lâminas são impelidas pelo movimento do fluxo de gás que pode incidir nos sentido radial, tangencial ou axial, dependendo da disposição de construção do rotor. A velocidade do rotor é linearmente proporcional ao volume deslocado. O volume de gás medido é determinado pela contagem do número de revoluções do rotor e a totalização desta vazão em volume pode ser realizada mecanicamente, através de um redutor de engrenagens que aciona um indicador, ou eletronicamente, através de um sensor que detecta o número de giros do rotor que através de circuitos faz a contagem dos pulsos gerados digitalmente.



Figura 10: Medidor Tipo Turbina para gás

O índice de pulsos é proporcional à vazão, e a resposta do medidor é muito boa. É definido então um coeficiente de vazão k (k -factor) para o medidor:

$$Q = \frac{f}{k} \quad (20)$$

Onde f é a frequência.