

5

Padronização primária para medição de vazão de gás natural

Padrões de medida são estabelecidos para cada uma das unidades (de base e derivadas) do Sistema Internacional de Unidades. De interesse para fundamentar o presente capítulo, discutem-se, a seguir, alguns conceitos relacionados aos padrões.

Os sistemas primários para calibração de medidores de vazão são rastreados aos padrões nacionais ou internacionais uma vez que a massa, o comprimento (volume) e a medição do tempo podem ser diretamente comparados aos padrões existentes. Os sistemas secundários de calibração são indiretamente rastreados aos padrões existentes através da calibração realizada por um sistema primário. O metro cúbico de gás natural medido no laboratório através do sistema primário deverá ser a referência do metro cúbico de gás natural de alta pressão.

Um sistema primário de calibração de medidores de vazão é baseado tipicamente nos métodos gravimétrico ou volumétrico. O método gravimétrico fornece a determinação direta da massa, enquanto que o método volumétrico utiliza medição de volume e da massa específica do gás.

O desempenho de um padrão primário pode variar significativamente dependendo da configuração física da bancada de calibração, do princípio de funcionamento e da experiência daqueles que a operam. A determinação da incerteza da medida ou a exatidão do padrão é quase sempre o parâmetro de maior importância quando um medidor de fluxo deve ser calibrado. A maioria dos laboratórios define seu desempenho de calibração em termos da determinação da incerteza total da medida de fluxo do sistema primário.

No presente trabalho foram analisados seis sistemas de padronização primária em operação nos principais centros de metrologia de países industrializados que executam a medição de vazão de gás mantido em alta pressão. São discutidos o seu princípio de funcionamento, suas características construtivas, as respectivas capacidades de operação (faixa de vazão e de pressão) e os parâmetros que contribuem para a determinação da incerteza de medição associada a cada método. Os padrões primários de medição de vazão discutidos têm o seu funcionamento baseado em princípios físicos e termodinâmicos bem

definidos resultando nos seguintes modelos:

- sistema gravimétrico;
- provador de campânula (volume variável e pressão constante);
- provador de pistão (volume variável e pressão constante);
- PVTt (pressão, temperatura, tempo variáveis e volume constante);
- dispositivo dinâmico de deslocamento (DDD);
- sistema óptico com o uso de velocimetria Laser por efeito Doppler.

A incerteza de medição de vazão de gás natural (para um nível de confiança de 95%) associado a um sistema primário encontra-se tipicamente na faixa de $\pm 0,01\%$ a $\pm 0,25\%$. Os sistemas de medição secundários são aqueles calibrados utilizando-se um sistema primário. A incerteza de medição total associada a essas medições está geralmente na faixa de $\pm 0,20\%$ a $\pm 0,75\%$. Os sistemas secundários de calibração incluem tipicamente os medidores que utilizam coeficientes experimentais determinados por um processo de calibração. Os exemplos de padrões secundários de fluxo incluem o medidor mestre do tipo turbina e o medidor do tipo Venturi (bocal sônico).

5.1

Padrões

Um conjunto de medidas materializadas similares ou instrumentos de medição quando utilizados em conjunto podem constituir um padrão coletivo. Um conjunto de padrões de valores escolhidos que, individualmente ou combinados formam uma série de valores de grandeza de uma mesma natureza é denominado coleção padrão [2].

Padrão internacional. Padrão reconhecido para servir, internacionalmente, como base para estabelecer valores a outros padrões da grandeza a que se refere.

Padrão nacional. Padrão reconhecido por uma decisão nacional para servir, em um país, como base para estabelecer valores a outros padrões da grandeza à qual está associada.

Padrão primário. Padrão que é designado ou amplamente reconhecido como tendo as mais altas qualidades metrológicas e cujo valor é aceito sem referência a outros padrões da mesma grandeza. O conceito de padrão primário é igualmente válido para as grandezas de base e para grandezas derivadas.

Padrão secundário. Padrão cujo valor é estabelecido por comparação a um padrão primário da mesma grandeza.

Padrão de referência. Padrão geralmente tendo a mais alta qualidade metrológica disponível em um dado local ou em uma dada organização, a partir do qual as medições lá executadas são derivadas.

Padrão de trabalho. Padrão utilizado rotineiramente para calibrar ou controlar medidas materializadas, instrumentos de medição ou materiais de referência. Um padrão de trabalho é geralmente calibrado por comparação com um padrão de referência. Um padrão de trabalho utilizado rotineiramente para assegurar que as medições estejam sendo executadas corretamente é chamado padrão de controle.

Geralmente os padrões primários de vazão têm utilização limitada cobrindo faixas da ordem de poucos metros cúbicos por hora. Assim, realiza-se a calibração de vários medidores de pequena vazão, considerados padrões de transferência. Utiliza-se, então, um conjunto de vários medidores de menor capacidade para calibrar medidores de maior capacidade para medição de vazão. Este é um processo que se repete sucessivamente, utilizando-se o processo de ampliação de vazão e pressão conhecido também como *bootstrapping*.

5.2

Unidades de base do SI

O SI constitui a abreviação para o Sistema Internacional de Unidades. Reflete um sistema coerente de unidades adotado e recomendado pela Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM). O SI foi adotado pelo Brasil e referenciado num Quadro Geral de Unidades de Medidas (QGU) [3].

Tabela 5.1: Unidades Base do SI

Grandeza	Definição	Símbolo
Comprimento	O metro é o comprimento do trajeto percorrido pela luz no vácuo, durante o intervalo de tempo de $1/(299.792.458)$ de segundo.	m
Massa	O quilograma é a unidade de massa igual à massa do protótipo internacional do quilograma.	kg
Tempo	O segundo é a duração de 9.192.631.770 períodos da radiação correspondente à transição entre dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo de césio 133.	s
Intensidade de Corrente Elétrica	O ampère é a intensidade de uma corrente elétrica constante que, mantida entre dois condutores paralelos, retilíneos, de comprimento infinito, de seção circular desprezível e situados à distância de 1 metro entre si, no vácuo, produz entre estes condutores uma força igual a 2×10^{-7} Newton por metro de comprimento.	A
Temperatura Termodinâmica	O kelvin é a fração $1/(273,16)$ da temperatura termodinâmica do ponto triplice da água.	K
Intensidade Luminosa	A candela é a intensidade luminosa, numa direção dada, de uma fonte que emite uma radiação monocromática de frequência 540×10^{12} hertz e cuja intensidade energética naquela direção é de $1/683$ watt por esterradiano.	cd
Quantidade de Matéria	O mol é a quantidade de matéria de um sistema contendo tantas entidades elementares quantos átomos existem em 0,012 kg de carbono 12.	mol

Resultado do consenso internacional, o SI é baseado em sete unidades - unidades de base - que caracterizam as grandezas fundamentais do sistema

e das quais derivam as demais unidades. Tendo em vista a relevância física e metrológica das unidades de Base do Sistema Internacional de Unidades (SI) para fundamentar o conceito de padronização primária, transcreve-se, na tabela 5.1 as definições dessas unidades tal qual foram aprovadas pela Conferência Internacional de Pesos e Medidas (CGPM).

Essas unidades de base do SI definem todas as outras (ditas derivadas) amplamente empregadas na tecnologia e na ciência.

5.3

Rastreabilidade referenciada a um padrão primário

Padrões são empregados na estruturação de uma cadeia contínua de comparações, denominada de cadeia de rastreabilidade. A garantia da rastreabilidade de medição efetuada pelo medidor calibrado depende das operações efetuadas durante as contínuas comparações, sempre tendo as incertezas declaradas.

A rastreabilidade é obtida pelas calibrações sucessivas, que possui início na realização das grandezas de base (e.g.: comprimento, tempo) ou seja, nas dimensões do padrão primário até os vários estágios de calibração dos medidores de vazão de gás, processo que se consegue por calibração.

Utilizando-se padrões de transferência em paralelo pode-se calibrar outro padrão de transferência de vazão de maior capacidade. Neste sentido a incerteza associada à medição de cada estágio da calibração vai aumentando. Para o desenvolvimento do modelo, os processos da medição e da avaliação da incerteza são basicamente os mesmos em cada estágio da calibração. O modelo somente deve ser desenvolvido para um estágio e pode então ser aplicado repetidamente para todos os demais estágios, utilizando-se os resultados do estágio precedente.

5.4

Sistemas primários para medição de vazão de gás natural

Os sistemas primários de calibração de medidores de vazão para gás podem ser reunidos em três grupos:

- sistemas volumétricos (piston prover, provador de campânula, PVTt);
- sistema gravimétrico;
- outros sistemas DDD e LDV.

O princípio de funcionamento do sistema gravimétrico se aproxima da definição de vazão mássica, que considera um fluxo de gás que é direcionado para dentro ou para fora de um vaso de pressão medição simultânea da massa e

do tempo. A vazão mássica é determinada pela pesagem do vaso antes e depois do seu enchimento. O vaso de pressão é utilizado para se manter a vazão de fluido através da seção de ensaio. A massa do fluido dentro do vaso de pressão é determinada antes e depois do período de observação do experimento. A vazão mássica do gás é obtida através da razão entre a massa do gás e o intervalo de tempo da calibração.

No sistema volumétrico a massa do gás é determinada a partir da medida do volume, pressão, temperatura, relacionando-as na equação de estado do gás.

Dois são os tipos de sistema volumétrico primário:

O sistema volumétrico primário PVTt (pressão, volume, temperatura e tempo) é aquele que apresenta volume constante e densidade variável. É constituído fisicamente por um vaso de pressão cujos volumes inicial e final são fixos e a densidade muda durante o período da calibração.

O segundo tipo de sistema volumétrico primário é aquele sistema em que a densidade do fluido de trabalho permanece constante e o volume pode variar, ou seja, o volume inicial e final são diferentes enquanto a densidade do fluido permanece constante (i.e. “provador de campânula” e “provador de pistão”). Dentre outros sistemas analisados destacam-se: o sistema óptico, que utiliza o laser Doppler velocimetria (LDV) e o dispositivo dinâmico de deslocamento (DDD). A figura 5.1 ilustra esses padrões primários para medição de vazão de gás natural.

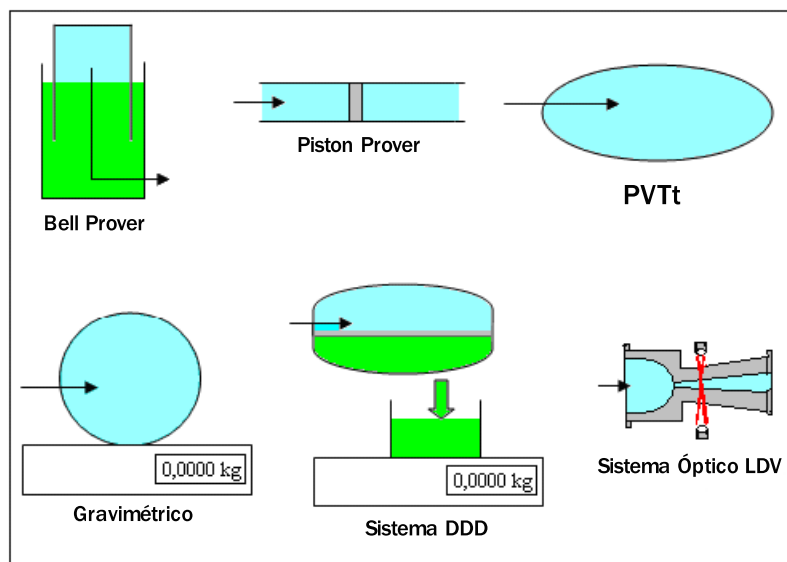


Figura 5.1: Sistemas primários para medição de vazão de gás natural

5.4.1

Representação matemática dos sistemas de medição de vazão

Um sistema primário de vazão volumétrica é representado matematicamente pela equação de conservação da massa. Essa equação fundamenta-se no fato de que a massa de um sistema fechado deve permanecer constante, independente de reações químicas. Para um dado volume de controle, a equação da conservação da massa na sua formulação integral é expressa pela equação:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_c} \rho dv + \int_{S_c} \rho \vec{v} d\vec{A} = 0 \quad (5-1)$$

Nesta expressão “ ρ ” é a massa específica do gás (considerada constante), “ d/dt ” termo transiente que centraliza variáveis temporais; “ V_c ” o volume de controle estacionário escolhido para o balanço de massa; “ \vec{v} ” a velocidade do gás e “ $d\vec{A}$ ” o elemento vetorial da área de superfície da unidade com o sentido externo e normal à superfície de controle que cerca o volume do controle. Para o sistema “provador de pistão” e para o “provador de campânula”, a equação de continuidade fornece a vazão mássica “ \dot{m} ” do sistema que é representada pela expressão já integrada:

$$\dot{m} = \frac{P_c \cdot V_c}{\Delta t} + \frac{\Delta \rho_a \cdot V_a}{\Delta t} + \dot{m}_f \quad (5-2)$$

Nesta expressão “ V_c ” é o volume de controle deslocado durante o intervalo de tempo referente ao deslocamento do pistão ou da campânula durante um intervalo de tempo “ Δt ”. A quantidade “ V_a ” refere-se ao volume restante no sistema (inclui o volume do medidor que está sendo calibrado, o volume da tubulação entre o medidor sob calibração e o calibrador, o volume da tara do prover e o volume da tubulação para conexões do transdutor de pressão). A massa específica média do gás no volume de controle “ ρ_c ” é calculada a partir da medição da pressão e da temperatura feitas durante a operação, e “ $\Delta \rho_a$ ” é a variação da massa específica média do gás na tubulação entre o início e o término da calibração. O segundo termo do lado direito da 5-3 leva em consideração o efeito de armazenamento no volume “ V_a ”. A distribuição da temperatura dentro do sistema deve alcançar o estado de equilíbrio, assegurando desta forma que não haja mudanças na densidade no sistema. O estado permanente pode ser alcançado quando as temperaturas são estabilizadas em uma dada condição de fluxo antes que a medição final do fluxo seja realizada. O termo “ \dot{m}_f ” refere-se aos fluxos de vazamento para dentro ou para fora do sistema (evaporação do líquido de selagem durante uma coleta do gás). A vazão do gás que passa através do medidor sob calibração é determinada a partir das medições de pressão, temperatura, volume e do tempo de trânsito de um volume deslocado do gás. As incertezas expandidas relativas associadas

aos sistemas primários de medição volumétricos são estimadas em $\pm 0,192\%$ para o “provador de pistão” e $\pm 0,172\%$ para o “provador de campânula” [17].

5.4.2

Sistema primário provador de campânula

O sistema primário de calibração provador de campânula (*bell prover*) possui como característica principal o volume variável para a calibração de medidores de vazão. É constituído fisicamente por dois tanques cilíndricos abertos em uma das extremidades. Estão montados justapostos para que exista um movimento relativo entre eles. O primeiro tanque que é aberto na parte superior é preenchido quase todo com óleo para a selagem do sistema. Pela parte superior é posicionado um segundo tanque cilíndrico invertido, isto é, a campânula móvel, que tem a forma de um sino, sendo aberta no fundo e fechada no topo com diâmetro menor que o primeiro, conforme ilustrado na figura 5.3. O movimento relativo entre os dois cilindros funciona como um êmbolo expulsando o gás para a seção de calibração. O peso da campânula é balanceado por contrapesos de modo que possa ser movimentada para cima ou para baixo por uma pequena pressão diferencial. Um contrapeso menor é montado em um came que fornece uma correção dos efeitos do empuxo, enquanto a campânula desce no líquido de selagem. Qualquer imperfeição do sistema de came e do contrapeso conduz à variação na pressão sob a campânula durante o intervalo de medição da vazão. Esta variação de pressão contribui para a incerteza na medição da vazão. Os rolos e as hastes de guia fornecem uma estabilidade lateral para posicionar a campânula enquanto esta se move verticalmente.

O sistema primário “provador de campânula” com selo de óleo é conhecido também como gasômetro ou campânula móvel, o volume interno deve ser bem determinado conforme ilustrado na figura 5.2 e representado pela expressão:

$$V = \sum_{i=1}^n (L_i \cdot d_i^2 \cdot \frac{\pi}{4}) \quad (5-3)$$

Esse sistema é o mais comum entre os laboratórios de calibração de medidores de vazão de gás. O sistema “provador de campânula” requer a medição da pressão e da temperatura interna, do tempo de observação do experimento e do comprimento da campânula deslocado. As condições de temperatura e de pressão devem permanecer constantes no interior da campânula durante o período da calibração. Esse sistema é utilizado como padrão de referência para medição de vazão a baixa pressão.

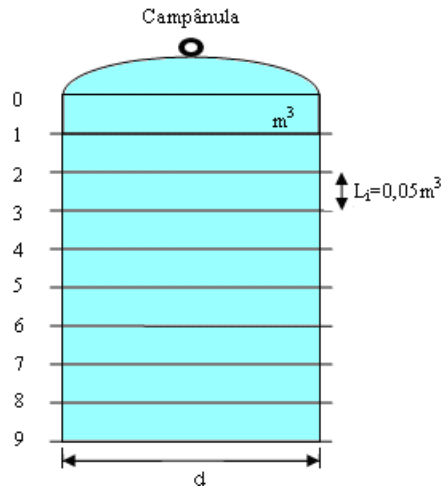


Figura 5.2: Campânula do sistema volumétrico

5.4.2.1

“Provador de campânula”: procedimento primário de calibração

A figura 5.3 ilustra a operação do sistema primário “provador de campânula”, sendo o volume coletado na campânula representado por “ V_c ”, o sensor de temperatura por “T”, os sensores da pressão por “P”, sendo equipado também com sensores para medir o tempo de descolamento da campânula.

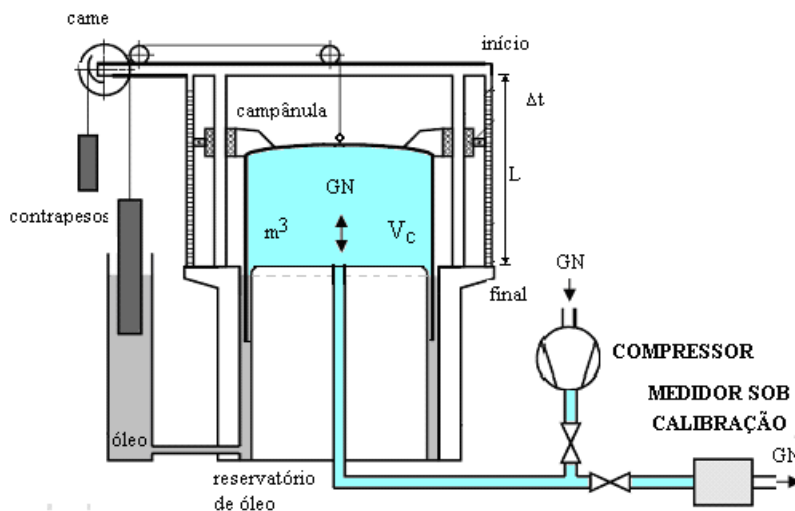


Figura 5.3: Sistema primário volumétrico (provador de campânula). (Fonte: modificado de [27])

Na calibração utilizando-se o “provador de campânula”, o fluxo é estabilizado através do medidor a ser calibrado posicionando-se a válvula de desvio para que a campânula esteja posicionada fora de sua sustentação inferior. A válvula é aberta e depois de um breve período de transiente de aceleração e de pressão, a campânula alcança uma velocidade constante, passando

pelo intervalo de medição de vazão. O intervalo de tempo é medido pelo acionamento de interruptores ópticos que designam as posições de início e final de curso acionando um cronômetro. A temperatura “ T ” e a pressão “ P ” do gás são medidas durante esse intervalo de calibração. A pressão do gás na campânula é medida por um transdutor de pressão absoluta conectado na tubulação de escoamento. O gás é forçado a fluir pelo movimento descendente da campânula e passa pelo medidor sob calibração. Esse método é conhecido como *flying – start – flying – finish*, implica no disparo simultâneo dos pulsos do medidor de vazão e do sensor de deslocamento da campânula [27]. As medições da temperatura e da pressão são realizadas por sensores localizados na campânula e após o medidor de vazão. O volume de referência do sistema de medição “ V_r ” é obtido pela correção do volume medido da campânula “ V_c ” e das condições de operação do medidor, conforme representado na seguinte expressão:

$$V_r = V_c \cdot \frac{P_c T_M}{P_M T_C} \quad (5-4)$$

O volume indicado no medidor “ V_i ” é determinado em função dos pulsos de saída do medidor e do “*fator K*” nominal do medidor.

$$V_i = \frac{N}{K_{nom}} \quad (5-5)$$

A vazão de referência “ Q_r ” é obtida a partir da medição do tempo de descida da campânula. A vazão, que passa no medidor a ser calibrado, é obtida a partir da medição do volume da campânula. Sua expressão é dada por:

$$Q_R = \frac{V_R}{t} \quad (5-6)$$

Nesta expressão “ $t = t_B$ ” ou “ t_M ”

A vazão indicada no medidor é determinado pela expressão:

$$Q_i = \frac{V_i}{t} \quad (5-7)$$

O erro percentual “ E ” é determinado pela seguinte expressão:

$$E = \frac{V_i - V_R}{V_R} 100 \quad (5-8)$$

Nesta expressão:

P_c : pressão absoluta na campânula (Pa)

P_M : pressão absoluta no medidor sob calibração (Pa)

T_c : temperatura absoluta na campânula (K)

T_M : temperatura absoluta no medidor sob calibração (K).

V_C : volume na campânula (l)

N: número de pulsos no medidor

K_{nom} : fator K do medidor (pulsos/l)

T: tempo (s)

Q: vazão volumétrica (l/s)

5.4.2.2

Componentes da incerteza do sistema “provador de campânula”

Os componentes que influem na incerteza de medição para o sistema “provador de campânula” estão baseados no(a):

- medição da densidade do gás (que por sua vez está baseada na incerteza das medições da temperatura e da pressão) e nos dados experimentais da densidade;
- medição do volume da campânula (determinado por transferência direta de volumes de gás de recipientes calibrados ou os métodos que envolvem a medição dimensional direta da campânula), na determinação da área externa da campânula, da espessura e da medição do deslocamento, no nível do óleo, no volume do filme de óleo aderente e na expansão térmica da campânula;
- medição do tempo, na calibração do cronômetro e no dispositivo de atuação;
- efeito de empacotamento do gás;
- vazamento e pressão de vapor.

A determinação da incerteza associada a vazão do “provador de campânula” é obtida através da raiz da soma dos quadrados das incertezas associada à medição da massa específica, do volume, do tempo e do armazenamento como listados na tabela 9. Para o modelo da referência [27], a incerteza padrão combinada relativa do sistema “provador de campânula” para o modelo da referência é de $\pm 0,086\%$. Aplicando-se um fator da abrangência de dois e para um nível de confiança de 95%, obtém-se uma incerteza relativa expandida de $\pm 0,172\%$ para o sistema primário “provador de campânula” [27].

A tabela 5.2 apresenta os componentes da incerteza para um sistema “provador de campânula” típico [6]. As quantidades da coluna valor são as incertezas padrão para cada categoria de incerteza. A coluna “%” refere-se às incertezas padrão para cada categoria da incerteza expressa em porcentagem.

Tabela 5.2: Incertezas associadas ao “provador de campânula”. [27]

Categoria da incerteza	Incerteza relativo padrão	
	Valor	%
Aquisição de volume densidade		0,045
Temperatura	0,067 K	0,022
Pressão	0,023 kPa	0,023
Função apropriada		0,029
Dados experimentais		0,012
Aquisição de volume		0,043
Área da campânula		0,026
Área da seção de parede da campânula		0,007
Aquisição de comprimento		0,030
Expansão térmica da campânula	1,25 x 10 ⁻² cm	0,007
Aderência da película de óleo		0,013
Aquisição de Tempo		0,057
Calibração do temporizador	1,0 x 10 ⁻⁴ s	0,001
Atuação do temporizador	6,0 x 10 ⁻³ s	0,040
Movimento lateral da campânula	6,0 x 10 ⁻³ s	0,040
Efeitos do armazenamento		0,011
Escapamento e pressão do vapor		0,010
Incerteza combinada		0,086
Incerteza expandida		0,172

5.4.3

Sistema primário provador de pistão

O sistema primário “provador de pistão” tem como princípio de funcionamento a medição do intervalo de tempo necessário para deslocar um volume conhecido de gás, medindo-se simultaneamente a temperatura e pressão do gás. O sistema é dinâmico, sendo a vazão de gás é determinada pelo movimento de um pistão enquanto esse passa por sensores de posição para a medição do tempo decorrido. O sistema “provador de pistão” não apresenta selo de óleo, possui o volume interno bem determinado e requer medição da pressão, temperatura interna, tempo e deslocamento. A velocidade de curso do pistão deve permanecer constante. Este sistema é utilizado como padrão primário no Laboratório PIGSAR para garantir a rastreabilidade da vazão dos laboratórios da Alemanha. Podendo operar com pressões variando de 1×10^5 Pa até 9×10^6 Pa (1 bar a 90 bar). A figura 5.4 ilustra o funcionamento do sistema primário de calibração “provador de pistão”.

5.4.3.1

Procedimento de calibração com o provador de pistão

A figura 5.4 ilustra a operação do sistema primário “provador de pistão”, onde inicialmente o gás passa através da válvula de quatro vias e pela válvula S_2 , a válvula S_1 ainda está fechada, quando o gás passa pelo prover sem mover o pistão e finalmente passa pelo medidor a ser calibrado, de onde

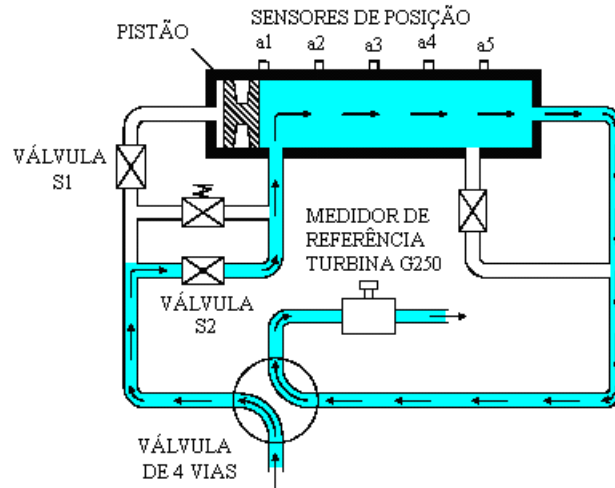


Figura 5.4: Desenho esquemático do (provador de pistão). (Fonte: modificado de [14])

retorna a rede de alta pressão. Nesta posição o pistão está junto à extremidade esquerda do prover e não se move. Quando as condições de fluxo estão estáveis (temperatura, pressão e fluxo constante), fecha-se o circuito do gás entre o “provador de pistão” e o medidor de vazão a ser calibrado e as medições das grandezas referidas iniciam-se simultaneamente. Permitindo, desse modo, que o gás escoe atrás do pistão que começa então a mover-se conforme ilustrado na figura 5.5. A partir do movimento do pistão inicia as medições dos impulsos de saída do medidor, do tempo, da pressão e da temperatura. A tubulação tem comprimento tal que assegura uma seção de entrada reta suficientemente longa a fim de evitar aceleração do pistão durante as medições. Durante o movimento do pistão obtêm-se três medições de vazão decorrentes da passagem do pistão em três volumes pré-definidos do prover sendo esses comparados com a vazão medida no medidor sob calibração. A diferença dos três valores obtidos de vazão deve estar dentro de uma faixa muito estreita de tolerância menor do que 0,01%. Os três valores de vazão medidos devem ser corrigidos para a temperatura real do cilindro, a pressão da tubulação e para as condições do gás no medidor, de acordo com a eq. 5-9. Durante o movimento completo do pistão, são medidos os pulsos de saída do medidor sob calibração, as diferenças da pressão através do “provador de pistão” e as diferenças da pressão e da temperatura entre o “provador de pistão” e o medidor sob calibração.

Os sinais de medição dos sensores da pressão e da temperatura são obtidos por um sistema de aquisição de dados e transmitidos a um computador, que processa também os sinais do contador de pulso do medidor e do temporizador do “provador de pistão”. Uma válvula anti-retorno é utilizada para assegurar que o pistão possa ser movido da posição de fim de curso para a posição inicial

ao acionar-se a válvula de quatro vias para a reversão do sentido do fluxo e do pistão. Os tempos medidos são muito pequenos devido ao volume de medição do “provador de pistão” também ser muito pequeno. Um erro de um pulso produziria uma incerteza de medição elevada. Conseqüentemente, utiliza-se o método de dupla parada dos cronômetros. Esse método envolve o uso de dois cronômetros separados um para o *prover* e outro para o medidor calibrado, para medir o período entre dois impulsos associados às bordas da lâmina do rotor do medidor de referência do tipo turbina, para os pulsos gerados. O medidor de referência é calibrado em três estágios da pressão (16 bar, 35 bar e 50 bar) e para 10 vazões diferentes em cada estágio da pressão. Um polinômio é utilizado para descrever a curva de calibração sobre a escala inteira do número de Reynolds.

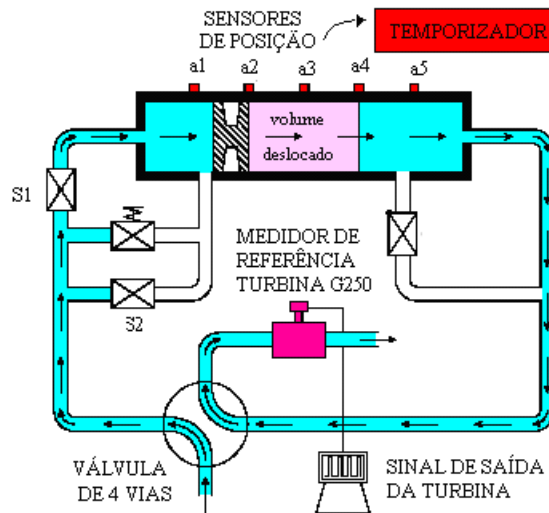


Figura 5.5: Operação do sistema primário volumétrico (provador de pistão). (Fonte: modificado de [14])

Na figura 5.5 o desenho esquemático ilustra o fluxo de gás que conduz o pistão, sendo o medidor de referência do tipo turbina calibrado pela comparação da indicação do medidor com o volume deslocado.

O volume real do medidor “ V_m ” é representado matematicamente pela expressão:

$$V_m = V_{PP} \frac{T_m P_{PP} Z_m}{T_{PP} P_m Z_{PP}} + V_D \left(\frac{\Delta T}{T_a} - \frac{\Delta P}{P_a} \right) \quad (5-9)$$

Nesta expressão:

V_m : volume real do medidor de referência,

V_{PP} : volume deslocado do “provador de pistão”,

$\Delta T/T_a$: diferença de temperatura entre o começo e final da medição,

$P_{PP}; P_m$: pressões do gás no “provador de pistão” e no medidor,

$\Delta P/P_a$: diferença de pressão entre o começo e final da medição,

$T_{PP}; T_m$: temperatura do gás no “provador de pistão” e no medidor,

$Z_{PP}; Z_m$: compressibilidades do gás no “provador de pistão” e no medidor

5.4.3.2

Componentes da incerteza do sistema “provador de pistão”

Os componentes que influenciam a determinação da incerteza da medição de um sistema “provador de pistão” são: a geometria do volume do “provador de pistão”, a repetitividade do ensaio, a contagem de pulso, a medição da temperatura, a medição da pressão absoluta, a medição do poder calorífico, a medição da massa específica do gás e o método de regressão. Resultando em uma incerteza expandida de 0,176% para o modelo utilizado na referência [27], conforme apresentado na tabela 5.3.

Tabela 5.3: Incertezas associadas ao “provador de pistão”. [27]

Categoria da incerteza	Incerteza relativo padrão	
	Valor	%
Aquisição de volume densidade		0,053
Temperatura	0,108 K	0,037
Pressão	0,022 kPa	0,022
Função apropriada		0,029
Dados experimentais		0,012
Aquisição de volume	2,448 cm ³	0,033
Diâmetro do cilindro	2,3 x 10 ⁻³ cm	0,032
Comprimento do prover	5,0 x 10 ⁻⁴ cm	0,001
Expansão térmica	4,8 x 10 ⁻¹ cm ³	0,006
Aquisição de Tempo	0,0102 s	0,061
Calibração do temporizador	1,0 x 10 ⁻⁴ s	0,001
Atuação do temporizador	8,5 x 10 ⁻³ s	0,057
Movimento do pistão		0,023
Efeitos do armazenamento		0,001
Escapamento e pressão do vapor		0,010
Incerteza combinada		0,088
Incerteza expandida		0,176

5.4.4

Sistema primário PVTt

O princípio de funcionamento do padrão primário PVTt é baseado na determinação da massa do gás que é coletada em um tanque cujo volume é previamente conhecido, medindo-se a pressão e temperatura do gás armazenado no tanque e o tempo de enchimento desse tanque. A massa do gás é calculada utilizando-se a equação de estado dos gases. Devido à necessidade de medição das grandezas (pressão, volume, temperatura e tempo) este sistema primário é denominado de PVTt.

A massa inicial e final do gás no tanque e no volume do inventário é determinada medindo-se a temperatura e a pressão do gás. A massa específica é calculada da equação de estado. Obtém-se a massa de gás multiplicando-se a massa específica de gás pelo volume apropriado. As propriedades termodinâmicas do gás devem ser conhecidas para o sistema primário PVTt, bem como para a calibração secundária do medidor de vazão. O sistema primário tipo PVTt é constituído por uma fonte de fluxo para o gás, válvulas para desviar o fluxo de gás, um tanque de armazenagem, uma bomba de vácuo, sensores de pressão e de temperatura e um medidor de vazão de referência do tipo Venturi (CFV).

O tanque ou conjunto de tanques de armazenagem de gás interligados pode estar imerso em água para que o gás coletado obtenha o equilíbrio térmico rapidamente, sendo que o volume do tanque é previamente calibrado.

O sistema PVTt tem como características o preenchimento de um volume bem determinado e requer medição da pressão, temperatura interna e do tempo decorrido. É o sistema utilizado pela *Gaz de France* e pelo NIST (EUA) para garantir rastreabilidade dos seus padrões de trabalho (medidores tipo bocal sônico). Utiliza válvulas de ação rápida para diminuir incertezas durante a calibração e requer o conhecimento da composição do gás natural.

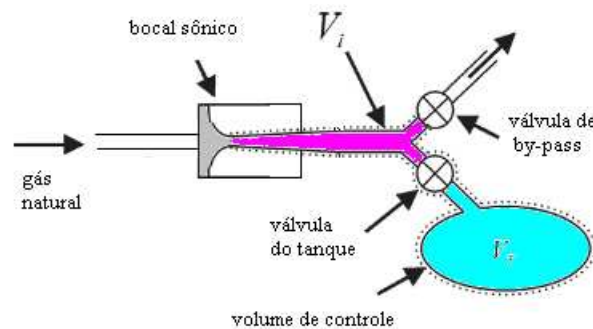


Figura 5.6: Sistema primário PVTt. (Fonte: modificado de [24])

Segundo o modelo da referência [25] o tanque é preenchido com gás a alta pressão, sendo a massa do gás determinada pela pressão e temperatura do tanque. O gás que sai do reservatório passa pelo medidor sob ensaio com a respectiva medição do período decorrido. Após o término do ensaio o tanque é estabilizado e a massa final é determinada. A vazão mássica é determinada da massa final menos a massa inicial dividida pelo tempo decorrido durante o experimento.

5.4.4.1

Desenvolvimento teórico do fluxo de massa para o sistema PVTt

O sistema de PVTt obtém a vazão mássica do escoamento do gás que passa pelo medidor CFV utilizando-se uma técnica da medição baseada no princípio da conservação da massa. A figura 5.6 ilustra o volume de controle que inclui o volume do tanque “ V_T ” e o volume do inventário “ V_I ”. Para a vazão do fluido no volume de controle, a taxa da acumulação de massa é igual ao fluxo líquido da massa através da fronteira representado pela expressão:

$$\dot{m}_{liq} = \frac{dM}{dt} \quad (5-10)$$

Nesta expressão “ M ” é a massa total no volume do controle, “ M_T ” a massa do tanque e “ M_I ” a massa do volume do inventário.

$$M = M_T + M_I \quad (5-11)$$

Sendo nesta expressão, “ m_{liq} ” o fluxo líquido de massa no volume do controle, “ \dot{m} ” a soma do fluxo mássico do medidor CFV e “ m_v ” a vazão de vazamento do fluxo mássico no volume do controle do ambiente que cerca o tanque.

$$\dot{m}_{liq} = \dot{m} + m_v \quad (5-12)$$

Embora o sistema PVTt seja projetado para medir “ \dot{m} ”, o sistema não distingue entre o fluxo mássico do CFV e de outras fontes do fluxo, isto é, os vazamentos, sendo “ \dot{m}_{liq} ” a vazão medida realmente.

Considerando-se a taxa de vazamento insignificante, a taxa instantânea da acumulação mássica, “ dm/dt ” é constante e igual a:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{\Delta M}{\Delta t} \quad (5-13)$$

Sendo nesta expressão, $\Delta t = t^f - t^i$ a média do período de calibração e $\Delta M = M^f - M^i$ a massa acumulada durante este período. As massas iniciais e finais do volume de controle, “ M^i ” e “ M^f ” correspondem aos tempos que coincidem com o começo e fim do período de calibração “ t^i ” e “ t^f ”, respectivamente. A massa total “ ΔM ” acumulada no volume de controle, é obtida de “ ΔM_T ”, que é a massa acumulada no tanque de calibração e a massa acumulada no volume de inventário “ ΔM_I ”.

$$\Delta M = (M_T^f - M_T^i) + (M_I^f - M_I^i) = \Delta M_T + \Delta M_I \quad (5-14)$$

Cada uma das quatro massas na expressão 5-14 é determinada multiplicando-se o volume do tanque de calibração “ V_T ” ou volume do inventário “ V_I ” pela massa específica média do gás nessa região de interesse. O volume “ V_I ” é determinado antes de cada ciclo de calibração, enquanto “ V_T ”

é determinado previamente e utilizado em diversas calibrações até que alguma mudança física seja realizado no volume do tanque ou então até a calibração seguinte.

Os valores “ V_T ” e “ V_I ” permanecem constantes mesmo com as variações de temperatura e pressão que experimentam durante um ciclo de calibração. As massas acumuladas em “ V_T ” e “ V_I ” são obtidas por:

$$\Delta M_T = (\rho_T^f - \rho_T^i)V_T \quad (5-15)$$

$$\Delta M_I = (\rho_I^f - \rho_I^i)V_I \quad (5-16)$$

Substituindo-se a massa específica do gás “ ρ ” obtido da equação de estado, nas massas acumuladas no tanque de calibração “ ΔM_T ” e para os volumes do inventário “ ΔM_i ”.

$$\rho = \frac{P \cdot M}{Z \cdot R \cdot T} \quad (5-17)$$

Sendo nesta expressão “ M ” o peso molecular do gás, “ R ” a constante universal dos gases, “ Z ” o fator de compressibilidade para o gás, “ P ” e “ T ” são pressão e temperatura médias, respectivamente. Reescrevendo eq. 5-15 e eq. 5-16 nos termos da eq. 5-12 a expressão para a vazão mássica resulta em:

$$\dot{m} = \frac{\Delta M_T + \Delta M_I}{\Delta t} \quad (5-18)$$

Sendo o efeito do vazamento desprezível para o calculo da vazão mássica do medidor CFV, porém, é considerado na determinação da incerteza para a medição da vazão mássica. Substituindo-se “ ΔM_T ” e “ ΔM_I ” na eq. 5-18, a vazão mássica do medidor CFV é representada pela seguinte expressão:

$$\dot{m} = \frac{M}{R_u} \left[\left(\frac{P_T^f}{Z_T^f T_T^f} - \frac{P_T^i}{Z_T^i T_T^i} \right) V_T + \left(\frac{P_I^f}{Z_I^f T_I^f} - \frac{P_I^i}{Z_I^i T_I^i} \right) V_I \right] \quad (5-19)$$

5.4.4.2

O processo de calibração realizado pelo sistema primário PVTt

O processo de calibração realizado pelo sistema primário PVTt está representado na figura 5.7 e envolve as seguintes etapas:

- Abre-se a válvula de desvio do tanque, e se estabelece fluxo através do medidor de referência a ser calibrado CFV;
- Realiza-se vácuo no tanque de armazenagem “ V_T ” com um auxílio de uma bomba de vácuo;
- Adquire-se os valores iniciais de “ P ” e “ T ” para o tanque após a estabilização das condições de pressão e de temperatura no tanque. Esses

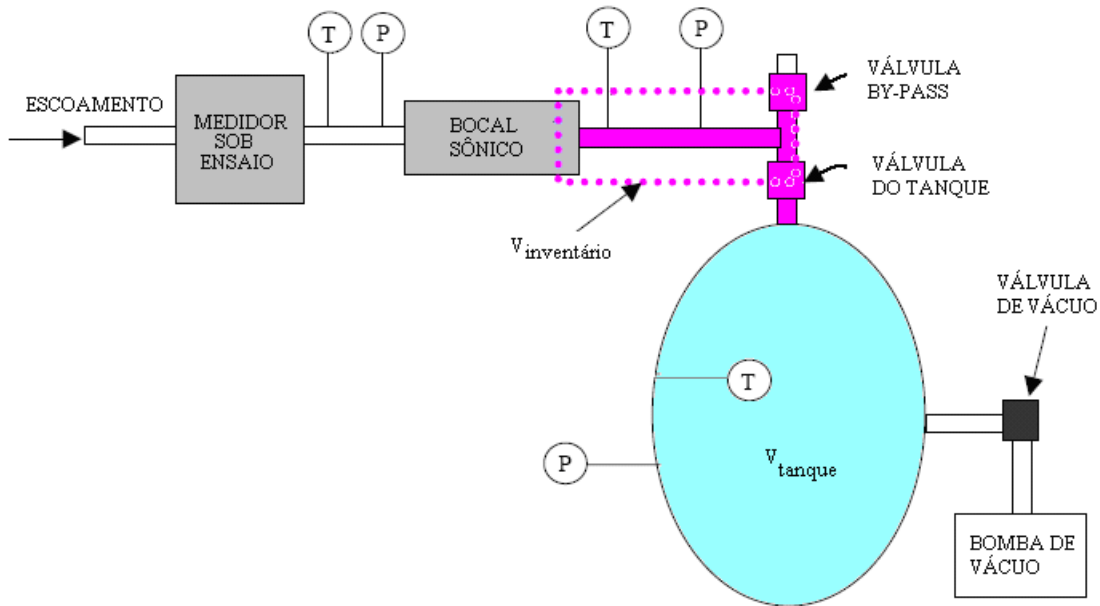


Figura 5.7: Representação esquemática do sistema PVTt. (Fonte: modificado de [10])

valores são utilizados para calcular a massa específica inicial e a massa inicial do gás no tanque;

- Fecha-se as válvulas de desvio e do tanque e realizam-se as medidas de pressão e temperatura iniciais no volume do inventário “ V_I ”. Esses valores são utilizados na equação de estado para o gás para obter-se a massa inicial do volume do inventário. Logo depois que a válvula de desvio é completamente fechada, abre-se a válvula do tanque.
- Espera-se encher o tanque a uma pressão alta pré-definida e então se fecha a válvula do tanque e obtém-se o tempo de realização do experimento “ t^f ”. Adquire-se a pressão e a temperatura no volume do inventário e a massa final do inventário. Abre-se a válvula de desvio.
- Espera-se a estabilidade e determina-se a massa do volume do controle composto do volume do inventário (volume definido pela linha tracejada na figura 5.7) e do volume do tanque.

A seguinte expressão representa o fluxo mássico médio durante o tempo de armazenagem:

$$\dot{m} = \frac{V_T(\rho_T^f - \rho_T^i) + V_i(\rho_i^f - \rho_i^i)}{t^f - t^i} \quad (5-20)$$

Sendo nesta expressão “ ρ ” a massa específica determinada da equação de estado do gás real eq.5-17.

5.4.4.3

Componentes da incerteza para o sistema primário PVTt

Os contribuintes mais importantes que influenciam na determinação da incerteza da medição do sistema primário volumétrico PVTt são o volume do tanque de armazenamento, a massa específica do gás no tanque cheio e incertezas relacionadas à alteração da medição da massa no volume do inventário. Para o modelo da referência [14] a determinação da incerteza para o sistema primário PVTt é de $\pm 0,1\%$.

Para o modelo da referência [11] a determinação da incerteza para o sistema primário PVTt com incertezas expandidas é de $\pm 0,20\%$. Os componentes da incerteza incluem o volume do tanque, o volume de inventário, as pressões do tanque e as temperaturas (inicial e valores finais), as temperaturas e as pressões do volume do inventário, o tempo de observação do experimento e a equação de estado do gás. As incertezas relacionadas aos erros de amostragem são significativas em um sistema de PVTt. O enchimento e o processo da evacuação do tanque conduzem gradientes de temperatura no tanque e no gás. Este gradiente de temperatura torna difícil de obterem-se as medidas médias da temperatura com baixa incerteza. Existem também flutuações da temperatura e da pressão durante a medida das condições iniciais e finais do volume do inventário conduzindo a incertezas na determinação da massa do volume do inventário.

Para o medidor de vazão calibrado com os bocais sônicos de referência, que são padrões trabalho calibrados regularmente de encontro ao sistema primário PVTt, sua incerteza expandida não é maior do que $\pm 0,3\%$.

5.4.4.4

Incerteza dos componentes auxiliares

Os componentes da incerteza são categorizados como sendo do tipo “A” (aqueles que são avaliadas por métodos estatísticos) ou do tipo “B” (aqueles que são avaliados por outros meios). A incerteza associada à medição da vazão mássica é determinada propagando-se incerteza de seus constituintes apresentados na eq. 5-19.

As maiores incertezas associadas à medição da vazão mássica são atribuídas às medições do volume do tanque de calibração “ V_T ” e de temperatura “ T_T^f ” que juntas contribuem com mais de 60% incerteza associada a medição da vazão mássica [11], considerando-se a incerteza de todos os componentes que afetam a medição da vazão mássica. São os seguintes parâmetros que influenciam a determinação da incerteza associada a medição de vazão para o sistema PVTt: “ R ”, “ M ”, seguidos pela medição do tempo

e a medição do volume do inventário (isto é, $P_I^i, P_I^f, T_I^i, T_I^f, Z_I^i, Z_I^f, eV_I$) e medições das seguintes grandezas na calibração do tanque de calibração (isto é, $P_T^i, P_T^f, T_T^i, T_T^f, Z_T^i, Z_T^f, eV_T$).

No desenvolvimento da expressão para a vazão mássica considera-se que o fluxo através do medidor de referência CFV permanece constante para o período inteiro de calibração. Entretanto, na prática, as condições do fluxo na entrada do medidor CFV não são perfeitamente alcançadas. A vazão mássica através de um medidor CFV “bloqueado” sob condições de fluxo constante, é obtida pela expressão:

$$\dot{m}_{CFV} = \frac{P_0 A_t C_s C_d \sqrt{M}}{\sqrt{R \cdot T_0}} \quad (5-21)$$

Nesta expressão a pressão de estagnação é representada por “ P_0 ”, a temperatura de estagnação “ T_0 ” na área de garganta por “ A_t ”, a função crítica do fluxo por “ C_s ” e o coeficiente de descarga por “ C_d ”. As condições do fluxo constante são obtidas mantendo-se “ P_0 ” e “ T_0 ” constantes durante o período de calibração.

A determinação da incerteza para a medição da vazão mássica é realizada utilizando-se o método da propagação da incerteza. O exemplo da referência [25] obtém uma incerteza expandida associada a medição da vazão mássica de 0,09%. Os maiores componentes da incerteza são atribuídos à medição do volume do tanque de calibração e a temperatura final do gás no tanque da coleção, juntos estes contribuem mais de 60% da incerteza total.

5.4.5

Sistema gravimétrico primário

O sistema gravimétrico primário se aproxima da definição de vazão mássica, (eq. 5-22), sendo que neste sistema o fluxo de gás é direcionado para dentro ou para fora de um vaso de pressão com a correspondente medição da massa e do tempo decorrido. A vazão mássica de gás é obtida pela diferença da massa do fluido dentro do vaso de pressão inicial e final (determinado pela pesagem do vaso de pressão antes e depois do escoamento) dividida pelo intervalo de tempo de calibração.

O fluxo de gás é desviado para o vaso de calibração quando este atinge uma condição estável para a medição do intervalo de tempo. A taxa de massa é determinada da medição da massa inicial e final de acordo com a eq. 5-23. Os sistemas gravimétricos primários para medição de vazão podem ser construídos em diferentes tamanhos. Devido à baixa densidade do gás natural é necessário um grande vaso de pressão para uma massa de gás relativamente pequena. Isto significa que o peso do vaso de calibração vazio é muitas vezes maior que

do que o peso do gás contido no vaso de pressão quando esse está cheio de gás. Desta forma a exatidão e sensibilidade do sistema de pesagem diminuem consideravelmente. Para minimizar este efeito, é utilizado um contrapeso ligado ao tanque, ou o vaso de calibração pode também ficar imerso em um tanque de água, conforme ilustrado na figura 5.8, para sofrer a força de empuxo além de estabilizar a temperatura. Dessa forma pode-se utilizar uma célula de carga de menor capacidade, porém, com alta resolução. O sistema primário gravimétrico de calibração é constituído fisicamente por três componentes principais que são: um tanque de pesagem, uma válvula de três vias e um sistema para a medição do tempo.

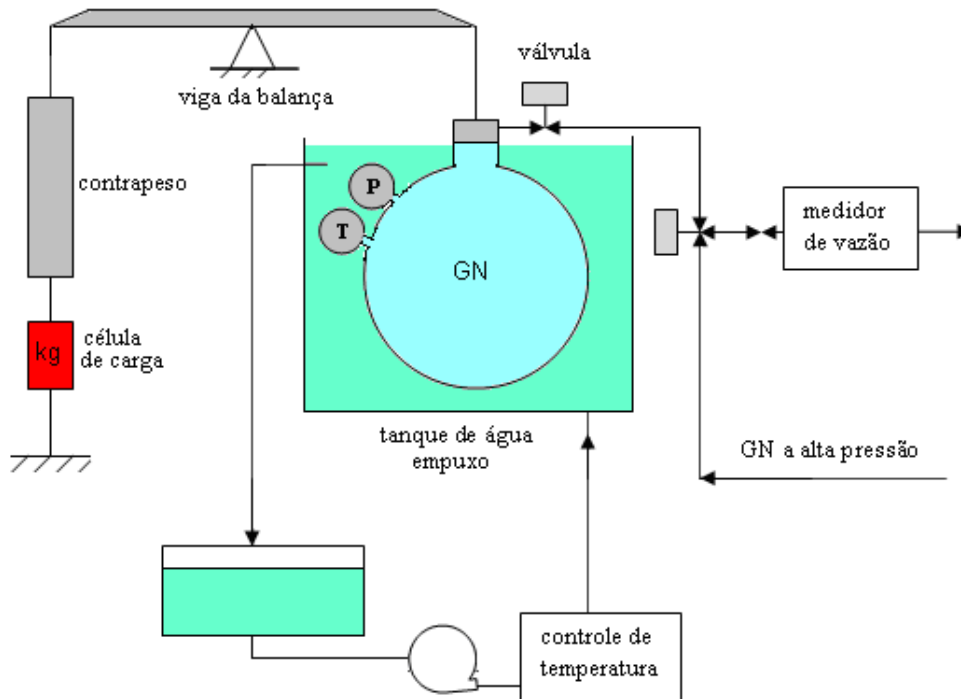


Figura 5.8: Representação esquemática do sistema PVTt. (Fonte: modificado de [10])

5.4.5.1

Procedimento de calibração com o sistema gravimétrico primário

O tanque de pesagem é instrumentado para medir a massa de gás do sistema e o tempo de descarga do gás do vaso de pressão para a seção de calibração. A vazão mássica média de gás “ \dot{m} ” é a taxa de massa descarregada “ Δm_D ” durante o tempo percorrido “ Δt ” conforme a seguinte expressão:

$$\dot{m} = \frac{\Delta m_D}{\Delta t} \quad (5-22)$$

Uma vez estabilizada a vazão através da seção de calibração, a válvula direcional de fluxo diversora do sistema é acionada para conectar o tanque de pesagem a fonte de escoamento de gás. Um sensor de posição é conectado à válvula diversora e gera um sinal para acionar simultaneamente a medição do tempo.

A massa descarregada “ Δm_D ” da eq. 5-22 é definida por [11]:

$$\Delta m_D = \Delta m_A + \Delta m_{TV} \quad (5-23)$$

Sendo nesta expressão “ Δm_A ” a massa de descarga do tanque de calibração e “ Δm_{TV} ” a massa de descarga do volume aprisionado.

A medição da massa de gás no sistema gravimétrico é realizada por células de carga instaladas em um braço em balanço conforme ilustrado na figura 5.8. O vaso de calibração é submerso em um tanque de água para que a força de empuxo cancele parcialmente o peso devido à massa do tanque. Existe a opção de adicionar peso de tara ao braço de balanço para contra balancear a massa do tanque.

A massa indicada pela célula de carga é dada pela seguinte expressão:

$$m_L = m_A + m_C - m_T - m_B \quad (5-24)$$

Nesta expressão “ m_A ” é a massa do gás dentro do vaso de calibração, “ m_B ” o componente do empuxo, “ m_T ” o peso da tara do vaso e “ m_C ” a massa do vaso calibrado. A eq. 5-24 pode ser rearranjada para fornecer a massa do gás dentro do tanque de calibração:

$$m_A = m_L + m_B - m_T - m_C \quad (5-25)$$

A massa do gás de descarga do tanque de calibração é obtida por:

$$\Delta m_A = \Delta m_L + \Delta m_B - \Delta m_T - \Delta m_C = \Delta m_L + \Delta m_B \quad (5-26)$$

Assumindo-se $\Delta m_C = \Delta m_T = 0$ e $\Delta m_L \gg \Delta m_B$ então

$$\Delta m_A = \Delta m_L = m_3 - m_2 \quad (5-27)$$

Sendo nesta expressão “ m_3 ” a massa inicial e “ m_2 ” a massa final de gás.

A capacidade do sistema gravimétrico é definida como a faixa de vazão mássica, pressão e temperatura que pode ser obtido para um valor de incerteza associada a medição.

Os componentes que contribuem para a determinação da capacidade do sistema são: volume do vaso de calibração, medição da pressão do sistema, medição da massa, medição do tempo decorrido, vazão do sistema. Antes do começo da calibração, o gás flui para fora do vaso através da seção de

calibração. Uma vez atingida uma condição estável, a válvula diversora é acionada para que o gás flua do tanque de armazenagem. O início da medição do intervalo do tempo está relacionado à atuação da válvula diversora. O movimento das válvulas de desvio deve ser rápido o suficiente para que o estado de fluxo permanente não seja interrompido. O intervalo de tempo deve ser suficientemente longo de modo que o sistema de medição do tempo tenha a exatidão necessária. A vazão mássica pode ser calculada da determinação da medição da massa e do tempo inicial e final.

5.4.5.2

Componentes da Incerteza

A incerteza associada à medição do sistema gravimétrico primário é composta pela incerteza proveniente da célula de carga, dos componentes para determinar a força de empuxo, do sistema de medição do tempo, do sistema de controle da temperatura e do sistema de controle de vazão. Para a análise do método gravimétrico deve-se levar em conta a incerteza associada com a calibração das células de carga, a incerteza restante é devida a medição do tempo de trânsito da válvula. Segundo o modelo da referência [26] uma análise da incerteza do sistema primário gravimétrico é baseada em diversos componentes e resulta em uma incerteza estimada de $\pm 0,073\%$ [26].

5.4.6

Sistema primário do tipo deslocamento dinâmico

O sistema primário conhecido como dispositivo dinâmico de deslocamento (DDD) é um padrão primário para vazão de gás que tem como princípio de funcionamento a determinação da vazão de gás no sistema através da medição direta da massa de óleo que é deslocado pelo correspondente volume de gás em um vaso de pressão que contém simultaneamente gás e óleo, conforme ilustrado na figura 5.9.

A maioria dos medidores de referência utilizados nas bancadas de calibração são medidores do tipo turbina. A calibração desses medidores é o resultado de um exercício que começa com a realização de um padrão de baixa vazão sob condições atmosféricas. A incerteza adicionada em cada etapa de calibração, embora pequena, para a pressão e para a vazão, resulta em um aumento considerável na final da cadeia de rastreabilidade. A realização primária com o sistema básico da verificação (BVS) tem uma incerteza associada à medição de $\pm 0,02\%$. No procedimento de múltiplos passos para a ampliação da vazão e pressão, a incerteza no final da cadeia aumenta até aproximadamente 0,30%.

O dispositivo dinâmico de deslocamento opera com vazões e pressões elevadas (9 bar), desta forma eliminando etapas na cadeia de rastreabilidade de medição de gás reduzindo a incerteza das etapas adicionais.

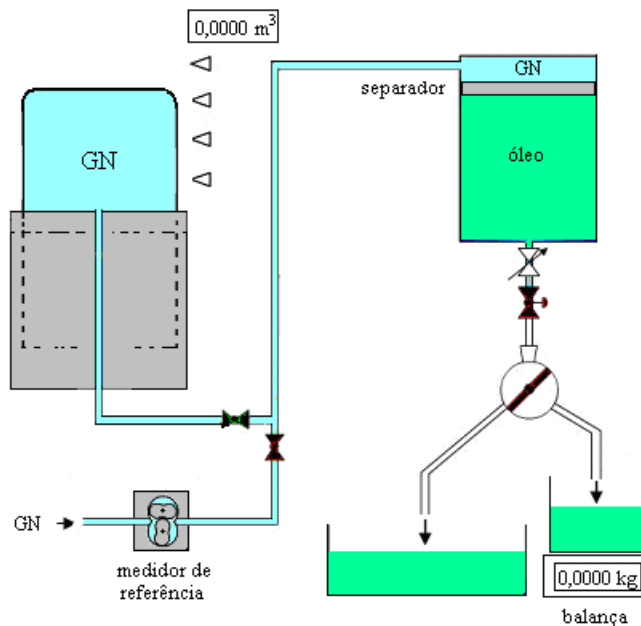


Figura 5.9: Dispositivo dinâmico de deslocamento

5.4.6.1

Descrição do dispositivo dinâmico de deslocamento

O diagrama simplificado dos equipamentos e da instrumentação que compõe o sistema DDD está ilustrado na figura 5.10 e possui os seguintes componentes:

- conexão de alta pressão ao gás natural ou aos outros gases;
- medidor sob calibração,
- vaso de alta pressão contendo óleo e gás com capacidade de 1.100 dm³ de óleo na condição cheio;
- flutuador utilizado como um separador do gás e do óleo e como posicionador para os sensores de temperatura na parte de baixo do compartimento do gás e para os sensores de temperatura na parte superior do compartimento do óleo, sensores estes conectados a uma ponte de Wheatstone;
- retorno de alta pressão da expansão do óleo para controlar a vazão do gás/óleo em alta pressão. O óleo pode ser expandido sem cavitações ou geração da espuma, o que poderia ocorrer quando passa para a pressão atmosférica, para evitar isso utiliza-se uma válvula esfera de segurança e uma válvula controle da vazão;

- medidor de vazão para líquido do tipo deslocamento positivo dimensionado para assegurar uma perda de pressão muito baixa;
- válvula de controle de vazão para baixa pressão;
- válvula de segurança para a pressão atmosférica;
- visor de vidro para verificar se a operação está livre de bolhas no gás;
- direcionador para se assegurar um jato de óleo na forma de cortina;
- balança e recipiente de pesagem para a determinação de massa até 600 kg (resolução 10 g);
- recipiente de óleo que possa ser pressurizado para reencher o vaso óleo/gás.

5.4.6.2

Processo de calibração com o dispositivo dinâmico de deslocamento

O processo chamado Sistema Básico de Verificação (BVS) é utilizado para calibrar a campânula e o medidor de vazão conforme ilustrado na figura 5.9. Com o objetivo de melhorar a incerteza de medição em cada uma das etapas da cadeia de rastreabilidade de medição de vazão a alta pressão, foi desenvolvido o dispositivo dinâmico de deslocamento (DDD).

O dispositivo dinâmico de deslocamento é constituído fisicamente por um vaso de pressão “A” que é preenchido com óleo de baixa viscosidade e baixo ponto de ebulição atmosférica. A parte superior do vaso é conectada à tubulação e a tomada da campânula “B” ou à tomada de um medidor de referência a ser calibrado “C”. Durante o processo de calibração o óleo que deixa o vaso através da tubulação é substituído pelo gás entregue pela campânula ou pelo gás que passa através medidor de calibração (medidor de referência). Na extremidade da tubulação é instalada uma válvula direcional de fluxo diversora. Esta válvula diversora tem em sua extremidade um bocal, que pode ser direcionado em duas posições através da ação de eletroímãs: à direita para direcionar o fluxo de óleo para o tanque de pesagem, ou à esquerda para direcionar o fluxo de óleo para o tanque armazenagem. Inicialmente a válvula diversora é direcionada para a posição em que o óleo escoe para o tanque de armazenamento.

A calibração começa a partir de um pulso elétrico gerado pelo movimento da campânula ou pelo medidor de referência da calibração. Este pulso ativa um eletroímã para trazer a válvula diversora para a posição de pesagem. Um segundo sinal da campânula ou do medidor de gás faz com que a válvula diversora retorne à posição em que o óleo escoe para o tanque de armazenamento. O reservatório de pesagem é situado sobre uma balança. A

bomba “H” é utilizada para retornar o óleo ao vaso de pressão “A”. Na linha de retorno um trocador de calor é instalado para manter estável a temperatura do óleo. A dependência da densidade do óleo com a temperatura é determinada empiricamente. O volume do óleo que deixa o vaso de pressão durante uma calibração é relacionado à massa do óleo coletado no reservatório que é pesado. O volume de óleo que deixa o vaso de pressão é igual ao volume do gás natural que fluiu na parte superior do vaso “A” durante a calibração e igual ao volume do gás natural nas condições da campânula ou do medidor de referência. Em vez de se utilizar o sistema de pesagem o medidor de vazão para líquido “E” pode ser utilizado para determinar o volume do óleo que escoou do vaso “A”. Nesse caso a válvula diversora dirige o fluxo do óleo continuamente para o tanque de armazenamento.

O medidor sob calibração é instalado na seção de calibração próximo ao reservatório para minimizar o volume inoperante. O laboratório deve ter um sistema de condicionamento de ar de alto desempenho para manter baixas as variações da temperatura durante a calibração. Para manter estabilidade no processo de calibração, a vazão do óleo liberado do bocal não deve ser afetada por movimentos do sistema diversor. O óleo que sai da tubulação principal no bocal alcançará subsequentemente condições atmosféricas neste momento. Devido à característica lubrificante e viscosa do óleo mineral é obtida a vedação do sistema. A vedação do sistema é garantida pelas características do próprio óleo (viscosidade e molhabilidade).

5.4.6.3

Características operacionais do dispositivo dinâmico de deslocamento

As características operacionais para o dispositivo dinâmico de deslocamento são:

- vazão máxima de gás de 50 m³/h na pressão atmosférica;
- vazão máxima de gás de 10 m³/h a pressão de 9 bar;
- relação de 1:50 na pressão em condições atmosféricas e de 1:10 a 9 bar;
- sistema de retorno do óleo ao vaso;
- oito sensores de temperatura para o compartimento do óleo e oito para o compartimento do gás;
- atuadores pneumáticos ativados por PLC;
- velocidade constante do óleo em todas as vazões;
- sistema de aquisição de dados;
- processo de calibração automatizado;

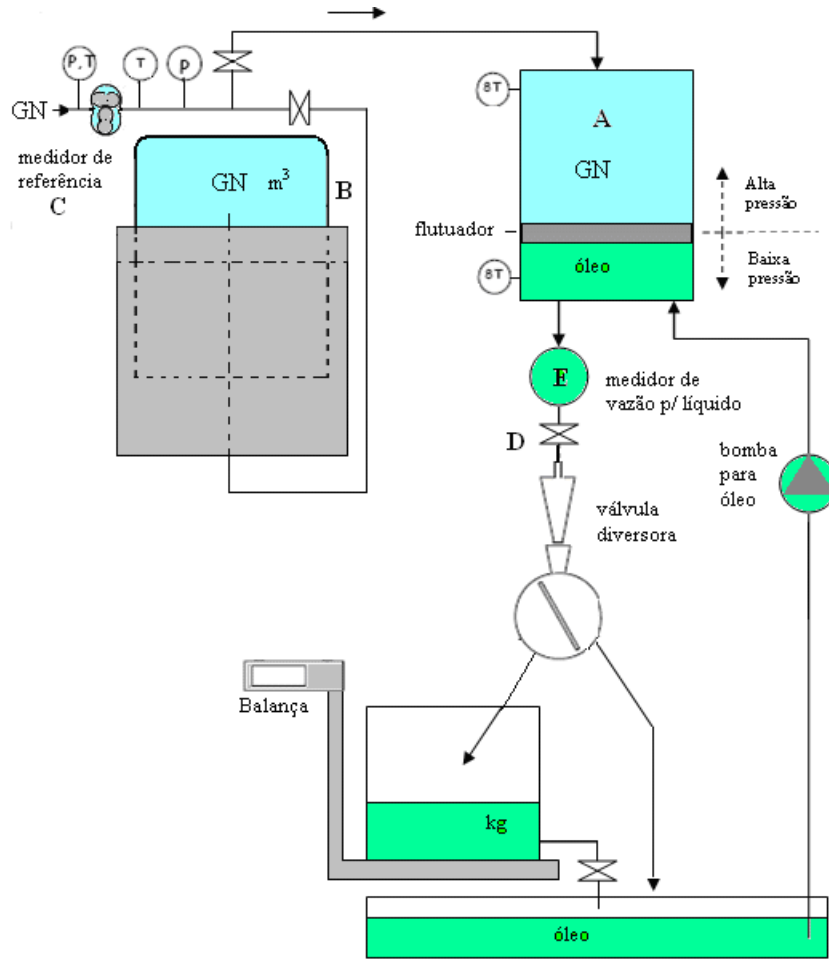


Figura 5.10: Dispositivo de deslocamento dinâmico 2000 NMi/VSL

- incerteza de 0,03% para a medição da vazão de referência na entrada do vaso gás/óleo;

5.4.6.4 Temperatura média no sistema DDD

A medição da temperatura do gás e do óleo no vaso “A” que contém simultaneamente gás e óleo tem um papel importante na realização primária e na determinação do volume do gás. Sensores de resposta rápida do tipo Pt-100 de 1 mm de diâmetro são utilizados para o compartimento inferior do gás no vaso “A” e o outro conjunto é instalado no compartimento mais elevado. Os dois circuitos de temperatura estão posicionados no flutuador. O vaso funciona como o banho termostático.

5.4.6.5 Compressibilidade do óleo no sistema DDD

Para a determinação do volume de gás no sistema primário DDD, mede-se a correspondente massa de óleo deslocado e determina-se o volume de óleo que foi deslocado pelo gás no vaso de pressão “A”, utilizando-se a massa específica do óleo corrigida pela pressão que está no vaso. A compressibilidade do gás natural a pressão de operação de 9 bar é a causa principal para o aumento da incerteza de calibração que é repassado às várias etapas na cadeia de rastreabilidade. Utiliza-se um algoritmo de cálculo para obter a compressibilidade do gás como o “S-GERG” ou “AGA-8”, o que contribui com uma incerteza de 0,1%. A compressibilidade do óleo é muito pequena em relação à compressibilidade do gás. A fim de determinar o efeito da compressibilidade do óleo, Cominges [16], sugeriu uma metodologia que utiliza um picnômetro (padrão para volume de líquido) imerso num vaso pressurizado equipado com visor de vidro cujas diferenças de altura do capilar de óleo são lidas e comparadas às variações da pressão reinante no vaso (figura 5.11). O tubo capilar do picnômetro tem resolução de 0,01 mm. Os resultados da determinação da compressibilidade do óleo em função da pressão estão apresentados na figura 5.11. A incerteza na determinação da mudança na densidade do óleo é estimada em 0,005% .

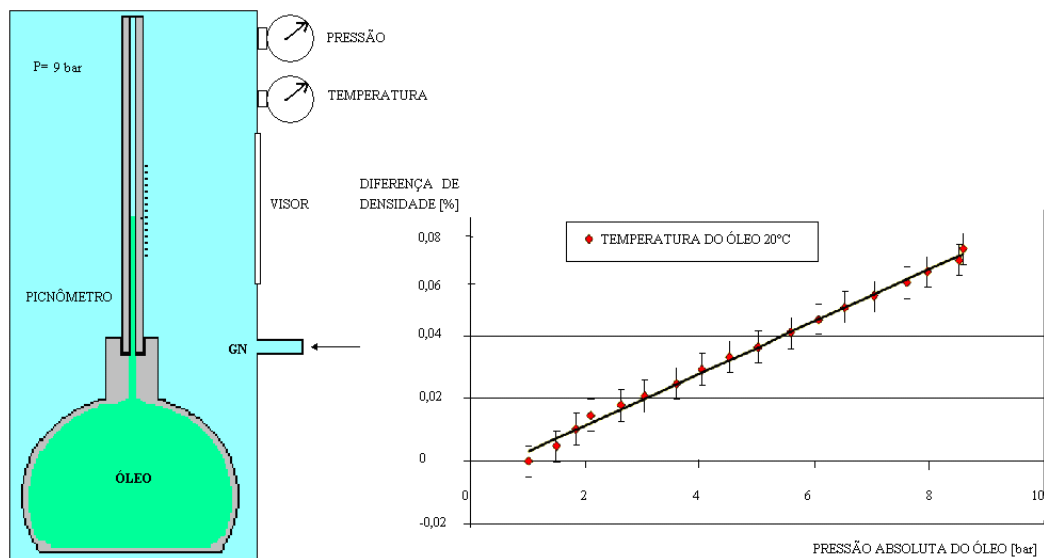


Figura 5.11: Compressibilidade, densidade do óleo em função da pressão

5.4.6.6

Redução do contato direto entre o gás natural e o óleo

Outra fonte da incerteza do sistema primário DDD é a solubilidade do gás natural no óleo na pressão de trabalho do sistema que é de 9 bar. Quando o gás está em contato com óleo, uma parte do gás dissolve-se no óleo. Em consequência a densidade do óleo diminui e isto afeta a determinação do volume do óleo e do gás de referência no vaso. Para diminuir a área de contato entre o gás natural e o óleo, utiliza-se um flutuador com um selo flexível atuando como um pistão separador.

5.4.7

Sistema óptico primário de velocimetria a laser por efeito Doppler

O laser Doppler velocimetria (LDV) é uma técnica óptica não intrusiva utilizada para medir a velocidade pontual do fluxo de gases e em líquidos translúcidos. Realizando-se medições em diversos pontos através da seção da tubulação, determina-se o perfil do fluxo e conseqüentemente a vazão pode ser calculada processando-se os dados que compõem esse perfil de fluxo.

O padrão óptico primário tem como princípio de funcionamento a medição da vazão do gás em alta pressão através da medição de velocidades pontuais por LDV em um acesso óptico ao gás através de janelas especialmente instaladas em um equipamento que contém incorporados um bocal sônico e um difusor conforme ilustrado na figura 5.12.

As medidas pontuais de velocidade são obtidas utilizando-se a técnica de laser Doppler velocimetria e convertidas em vazão volumétricas a partir da integração da velocidade do fluxo através de uma seção bem definida localizada no plano de saída do bocal, sendo rastreada diretamente às unidades do SI para as grandezas do comprimento e tempo. A velocidade do gás é medida por um anemômetro primário, o laser Doppler velocímetro (LDV) que usa o acesso óptico à tomada do bocal no conjunto de alta pressão. São realizadas medições simultâneas da temperatura e da pressão para determinar vazão mássica e volumétrica em condições de referência.

Uma fonte de luz coerente é utilizada para gerar dois feixes de laser que são direcionados transversalmente ao escoamento, interceptando-se em um ponto do escoamento do fluido, dando origem a franjas de interferência. A coerência do laser garante que a localização das franjas de interferência seja constante e a diferença de fase dos feixes seja independente do tempo. A interseção desses feixes é denominada de volume de medição. Uma partícula presente no fluido ao passar pelo volume de medição causa um espalhamento de luz que é detectado por um sistema óptico. A frequência dessa luz espalhada

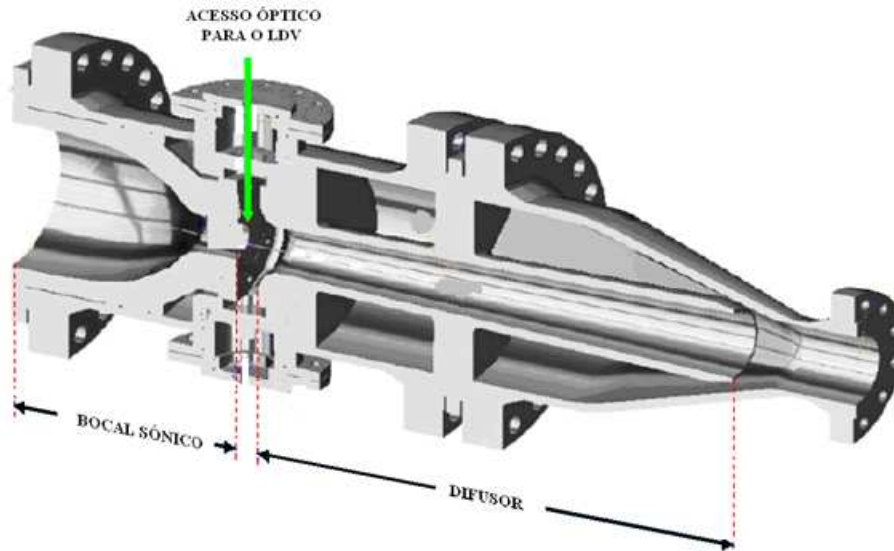


Figura 5.12: Padrão primário óptico LDV. (Fonte: modificado de [22])

é diretamente proporcional à velocidade da partícula na direção perpendicular às franjas de interferência. A grandeza desejada pode ser então calculada conforme ilustrado na figura 5.13. O contador mede o tempo de deslocamento de uma partícula sobre um número conhecido de franjas de interferência dos dois feixes de laser.

Fibras ópticas são utilizadas para transportar a luz do laser de alta potência e manter a qualidade do feixe na saída do equipamento. Desta forma a fonte de laser pode ser disposta separadamente da bancada de calibração através de um cabo óptico e de um sensor de LDV, tornando o conjunto de medição mais compacto [40].

O perfil de velocidade é obtido a partir da medição local da velocidade “ u ” em um elemento de área “ dA ” com o uso do LDV ao longo da seção transversal “ A ”, a vazão volumétrica “ q_v ” é obtida conforme a seguinte expressão:

$$q_v = \int_A u \cdot dA \quad (5-28)$$

5.4.7.1

Medição da velocidade por efeito Doppler (LDV)

A medição da vazão de gás é realizada a partir da medição da velocidade pontual por meio do feixe de laser baseado no efeito Doppler. O princípio da medição por LDV é ilustrada na figura 5.14. Um feixe de laser é dividido em dois que convergem subsequentemente no ponto em que se quer realizar a medição. A luz é refletida quando os feixes de laser incidem em uma minúscula partícula que se move com o gás e que passa no volume de medição. A

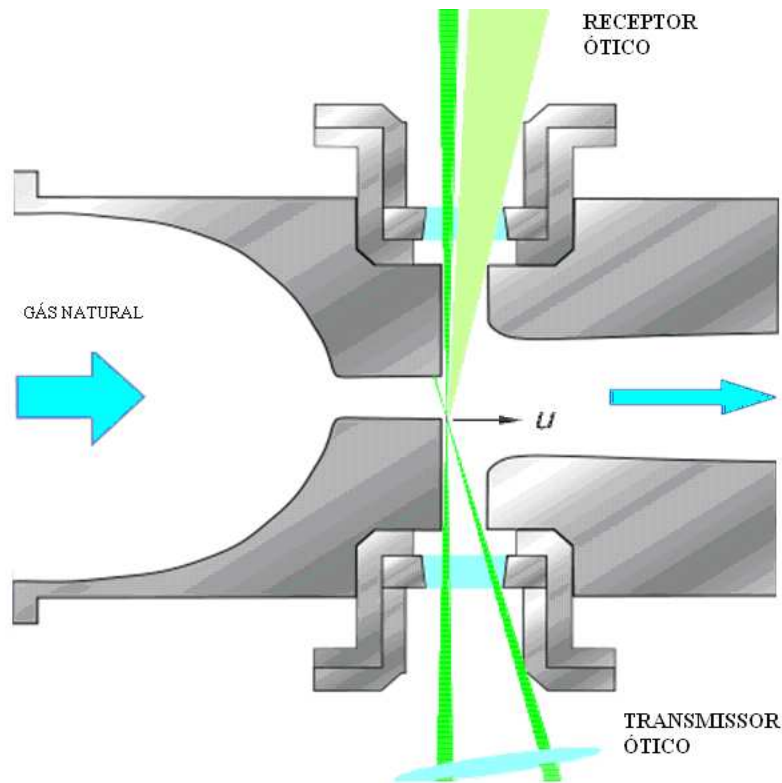


Figura 5.13: Sistema óptico. (Fonte: modificado de [22])

velocidade da partícula causa um deslocamento Doppler da luz refletida, a frequência do feixe refletido produz um sinal para o fotodetector relacionando-o diretamente a velocidade.

O conjunto do anemômetro a laser é composto dos seguintes componentes:

- fonte geradora do feixe de laser;
- conjunto óptico que divide o feixe central em dois feixes;
- canhão de prova de onde saem os dois feixes para se cruzarem no ponto focal (também contém o receptor foto-sensor);
- central de aquisição e conversão do sinal óptico;
- microcomputador para análise estatística, processamento e apresentação dos resultados.

Os dois feixes do laser geram a interferência no ponto de medida, representada pelas franjas de Fresnel que distam entre si de “ d ”. A velocidade da partícula gera um deslocamento da luz (efeito Doppler) e ao medir a frequência “ f ” do feixe determina-se o tempo em que a partícula do fluido leva para percorrer a distância “ d ” conhecida. Obtém-se então a velocidade do fluxo “ u ”:

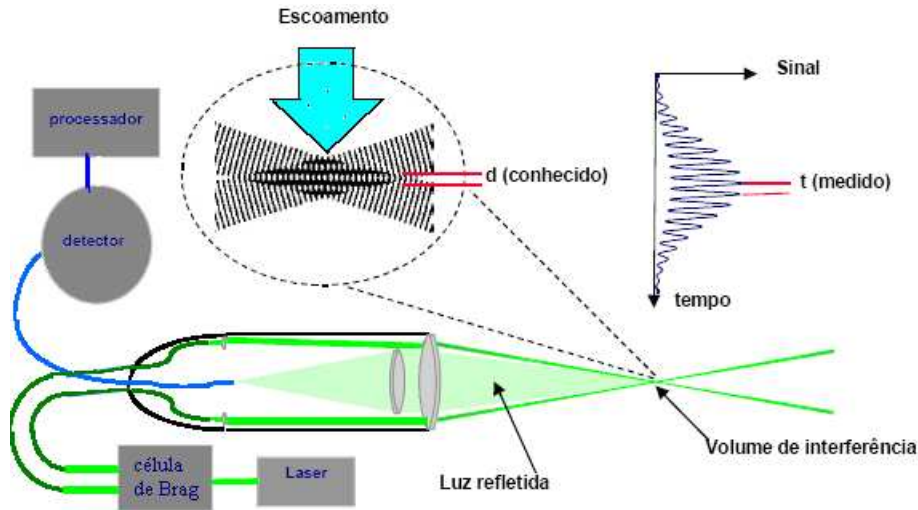


Figura 5.14: Representação esquemática dos componentes para medição de velocidade com LDV. (Fonte: modificado de [40])

$$u = \frac{d}{t} = d \cdot f \tag{5-29}$$

A técnica LDV requer a abertura de uma janela na tubulação de modo que as partículas contidas no gás reflitam a luz monocromática do laser que são por sua vez captadas pelo detector óptico. As medições são realizadas em um fluxo de gás constante e com um número de medições repetidas e tratadas estatisticamente a fim obter-se uma velocidade representativa do meio. O princípio de medição por velocimetria a laser pressupõe que as partículas que permeiam o meio gasoso, se movam com a mesma velocidade do gás e reflitam a luz coerente do feixe de laser. Os desenvolvimentos recentes em sistemas de processando de sinal de LDV foram significativos. Os analisadores de espectro tratam os sinais e utilizam a informação do sinal para determinar a frequência de Doppler. Esses equipamentos garantem a boa qualidade da medição ao filtrar os ruídos nele contidos.

5.4.7.2 Determinação da vazão

As medições com LDV são pontuais e para determinar a vazão em uma tubulação as medições pontuais têm de ser integradas para obter uma estimativa para a velocidade média.

$$q_v = \sum u_i dA \tag{5-30}$$

Estimar a vazão a partir de medidas pontuais é um problema tratado por diversas normas tal qual a ISO 3354. No método da área constante, a área da seção transversal de uma tubulação é dividida em áreas menores, as

medições são realizadas no centro de massa para cada área. A velocidade média é encontrada através da média ponderada de todas as velocidades obtidas.

5.4.7.3

O uso do sistema óptico primário no PIGSAR

O laboratório PIGSAR desenvolveu o padrão óptico primário como referência para medições de vazão. Utilizam-se três componentes LDV para melhorar as medições do perfil de velocidade na camada de limite do fluxo do bocal sônico. O equipamento de medição de vazão LDV é composto por laser de comprimento de onda estabilizado de argônio de duas cores. A vazão do gás é obtida pela integração numérica dos perfis de velocidade medidos através do plano da saída do bocal. A figura 5.15 ilustra o desenho do módulo bocal LDV para o padrão óptico primário.

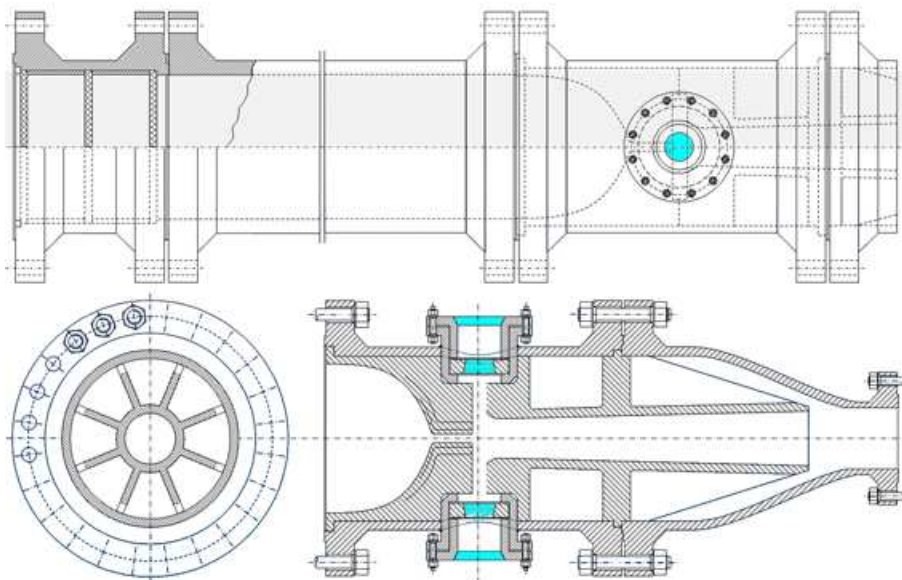


Figura 5.15: Módulo bocal LDV para o padrão primário óptico no PTB. (Fonte: modificado de [22])

A forma do bocal foi otimizada utilizando-se métodos numéricos incluindo cálculos envolvendo a camada de limite para evitar a separação do fluxo no bocal e obter um perfil homogêneo de velocidade.

A aceleração do fluxo no bocal reduz consideravelmente a turbulência. Determina-se assim o perfil de velocidade. Utilizam-se três bocais diferentes para cobrir a faixa da vazão dos padrões de transferência utilizados no Laboratório PIGSAR que variam de $10 \text{ m}^3/\text{h}$ a $1.600 \text{ m}^3/\text{h}$, de tal maneira que a velocidade na tomada do bocal não exceda 50 m/s , isso assegura condições ótimas para processar o sinal de LDV.

É necessária uma tubulação reta de entrada de aproximadamente 40 diâmetros nominais para condicionar o fluxo a montante do dispositivo. O bocal sônico mantém a vazão constante durante as medições com LDV. Um difusor é instalado a jusante do bocal para assegurar a estabilidade do fluxo.

O módulo é construído com duas janelas de vidro na superfície do bocal resistentes a alta pressão, permitindo o acesso óptico requerido para medições da velocidade, conforme ilustrado na figura 5.16.

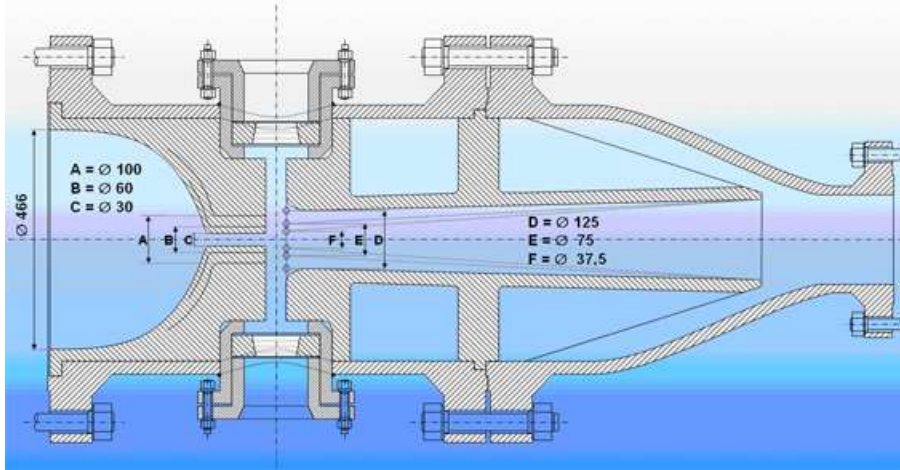


Figura 5.16: Módulo Bocal LDV para o padrão primário óptico. (Fonte: modificado de [17])

Devido ao comportamento compressível do gás natural, para a medição de vazão volumétrica torna-se necessário uma correção que considere esse efeito. Essas correções são implementadas através do fator de compressibilidade “Z”, que relaciona o diferente comportamento da compressibilidade entre gases reais e ideais. O método utilizado para calcular o fator de compressibilidade “Z” para o gás natural é composto pela equação de estado do segundo coeficiente virial (AGA-8, 1985). A composição do gás é determinada através de um cromatógrafo gasoso instalado em linha. O fator crítico do bocal no padrão primário é uma função da composição do gás, temperatura e pressão medidas no bocal.

5.4.7.4

Determinação da incerteza no sistema primário óptico

O dispositivo óptico primário pode utilizar três bocais com diferentes diâmetros que permitem medir vazões de $10 \text{ m}^3/\text{h}$ a $1600 \text{ m}^3/\text{h}$ que se sobrepõem conforme ilustrado na figura 5.17.

A determinação da incerteza associada à medição de vazão com o uso do LDV é de 0,1%. Um conjunto de bocais sônicos cobre uma ampla faixa de

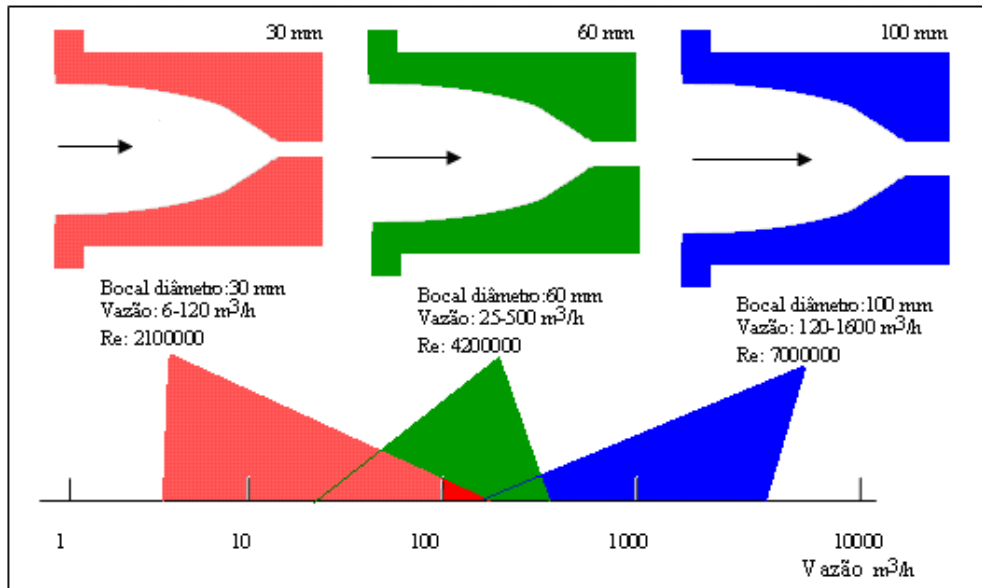


Figura 5.17: Faixa de vazão dos medidores primários com uso do LDV

vazão de 6,5 m³/h a 1.600 m³/h. Esses bocais são posicionados para que se possa operá-los em série com o “provador de pistão”.

A utilização LDV no sistema primário ótico traz várias contribuições à incerteza total da medição de vazão. A incerteza associada à medição de vazões até 1600 m³/h é de $\pm 0,1\%$.