



ENERGÉTICA
Qualidade do Ar

ENERGÉTICA IND.E COM. LTDA.
Rua Gravataí, 99 – Rocha
CEP 20975-030 Rio de Janeiro – RJ
CNPJ 29.341.583/0001-04 – IE 82.846.190
Fone: (0xx21) 2501-1998; Fax: (0xx21) 2241-1354
www.energetica.ind.br

PREPARAÇÃO DE ORIFÍCIOS CRÍTICOS PARA O TRIGÁS

Informativo Técnico

ÍNDICE		
	PREFÁCIO	
1.0	PROCEDIMENTO DE PREPARAÇÃO DE ORIFÍCIOS CRÍTICOS	1.1
1.1	Introdução	1.1
1.2	Material para o Ajuste	1.4
1.3	Montagem do Equipamento	1.6
1.4	Procedimento de Preparação	1.7
2.0	PRINCÍPIO DO ORIFÍCIO CRÍTICO	2.1
3.0	TABELA DA PRESSÃO DE VAPOR DA ÁGUA	3.1
4.0	REFERÊNCIAS	4.1

Responsável:

José Walderley Coêlho Dias

ENERGÉTICA - RIO DE JANEIRO

Data desta versão: 21/02/07

PREFÁCIO

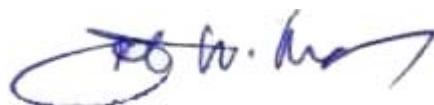
O objetivo deste manual é apresentar os procedimentos para a preparação de orifícios críticos utilizados como controlador de vazão em amostradores de pequeno volume para a coleta de gases - TRIGÁS e MONOGÁS.

O texto contido neste manual é uma compilação de várias seções contidas no manual do TRIGÁS (ver Ref. 9 na Seção 4.0).

Para melhor entendimento sobre orifícios críticos e sua calibração, este manual está apresentado em quatro partes:

- Procedimento de preparação de orifícios críticos (Parte 1.0)
- Princípio do orifício crítico (Parte 2.0)
- Tabela de pressão de vapor d'água (Parte 3.0)
- Referências (Parte 4.0)

Rio de Janeiro, 21 de Fevereiro de 2007



José Walderley Coêlho Dias

1.0 PROCEDIMENTO DE PREPARAÇÃO DE ORIFÍCIOS CRÍTICOS

1.1 Introdução

Os métodos de amostragem de poluentes gasosos normalmente especificam a que vazões as coletas devem ser realizadas. Por exemplo, para a medição do SO₂ pela pararrosanilina, o método usual pede vazão na faixa de 180 a 220 mL/min, ou seja, 200 mL/min com variação de $\pm 10\%$. E para a medição de SO₂ pelo peróxido de hidrogênio, na faixa de 1.800 a 2.200 mL/min, ou seja, 2.000 mL/min com variação de 10%.

Conforme já é conhecido, o TRIGÁS utiliza orifícios críticos como controladores (ou limitadores) da vazão. Para cada uma das três vias de coleta, há um orifício crítico com vazão pré-determinada pelo método de amostragem. Com o orifício crítico, em certas condições especiais, consegue-se manter a vazão através dos borbulhadores num valor constante, independente de flutuações na tensão elétrica ou na velocidade da bomba. Uma descrição detalhada do princípio do orifício crítico é apresentada na Seção 2.0

Os seguintes tipos de orifícios críticos poderiam ser usados indistintamente no TRIGÁS:

- Agulhas hipodérmicas
- Capilares de vidro

Entretanto, a ENERÉTICA tem optado pela agulha hipodérmica, por ser mais facilmente encontrada no mercado (farmácias, laboratórios farmacêuticos etc.). Entretanto, não é fácil encontrá-las com vazões nas faixas exigidas. Algumas vezes, por sorte, consegue-se achá-las com as dimensões adequadas, sem a necessidade de alterar sua área de passagem. Entretanto, na maioria das vezes, tem-se que ajustar sua área de passagem, até atingir-se a vazão desejada.

Ajusta-se uma agulha à vazão desejada por meio de um dispositivo de medição de vazão, geralmente um medidor de bolha de sabão, ou bolhometro, cujo procedimento será descrito neste trabalho. O bolhometro é essencialmente um tubo de vidro com duas marcas circunferenciais gravadas próximo às suas extremidades. As linhas circunferenciais delimitam um certo volume, V_m , também chamado de volume de deslocamento, determinado e certificado por algum ensaio formal.

Atenção: O usuário não deve, em hipótese nenhuma, utilizar o valor do volume fornecido pelo fabricante do frasco para o ajuste da agulha, pois, muitas vezes, este valor "nominal" do fabricante é bastante diferente do valor realmente medido (V_m). Os bolhometros fornecidos pela ENERÉTICA são normalmente fornecidos com certificados, com valores medidos do volume (V_m) rastreáveis ao INMETRO.

Para o ajuste, o frasco do bolhometro é colocado em posição vertical e instalado num sistema compreendendo também um bécher com água e sabão, um ou dois filtros de proteção, o orifício que se quer ajustar, uma bomba a vácuo, munida de vacuometro, um cronometro, um barometro, um higrômetro e um termometro. Ver esquema na Figura 1.1.

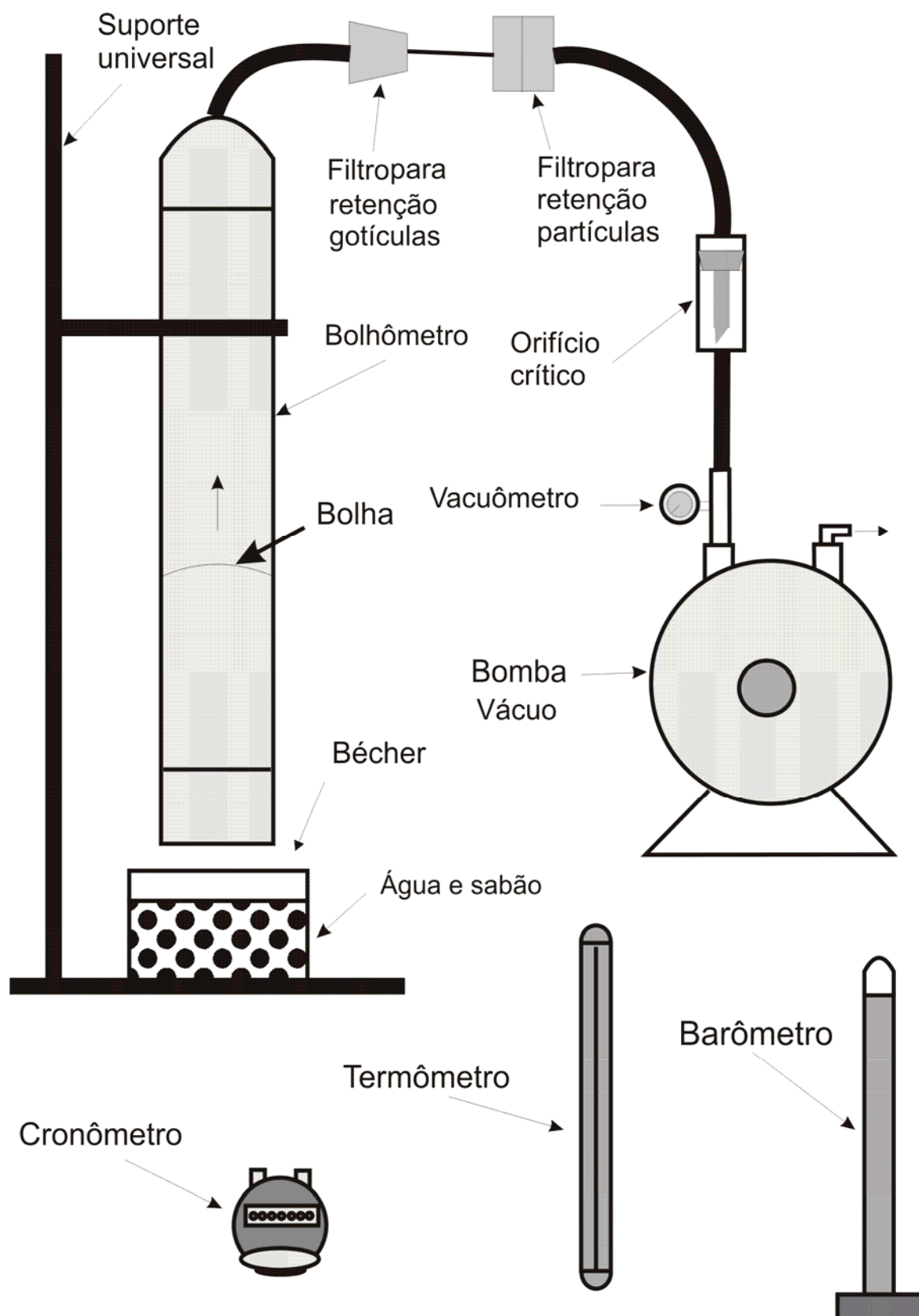


FIGURA 1.1

SISTEMA PARA AJUSTE DO ORIFÍCIO CRÍTICO

O orifício crítico tem seu tamanho limitado pela potência da bomba a vácuo utilizada, visto que há um certo tamanho (área de passagem interna) além do qual a bomba não consegue manter vácuo acima de um certo valor (de 429 mm Hg ao nível do mar, conforme demonstrado na Seção 2.0). No caso da bomba utilizada no TRIGÁS, é possível satisfazer estas condições para vazões de até 4 L/min, valor este bem superior à soma das vazões nos três orifícios normalmente usados no amostrador.

Atento às exigências no parágrafo acima, o usuário pode então promover a passagem de uma bolha pelo interior do bolhómetro, de baixo para cima, pela força de sucção da bomba. Forma-se a bolha colocando-se a superfície de água com sabão ou sabonete, contidos no bécher, em contacto com a boca inferior do frasco do bolhómetro. Para isso, o bécher é movido lentamente para cima até o contacto do espelho d'água com a borda da boca. No momento do contacto, a força de sucção da bomba promove a formação de bolhas, puxando-as para cima.

A velocidade com que a bolha se desloca no interior do frasco do bolhómetro dá uma idéia da vazão através do orifício. Os passos na prática são: cria-se a bolha na extremidade inferior, aciona-se o cronômetro quando a bolha passar pela linha circunferencial inferior do frasco e pára-se o cronômetro quando passar pela linha superior do frasco. Tem-se então o tempo cronometrado (t_c) em que a bolha percorre o volume indicado no certificado do bolhómetro (V_m).

Antes de dividir V_m por t_c e achar a vazão, tem-se ainda que corrigir V_m . Isto porque este volume pode ser um pouquinho maior do que o volume realmente deslocado visto que a água da bolha se evapora no gás atrás da bolha. Se o gás atrás da bolha tiver umidade superior a 50%, o erro é pequeno. Porém, se o gás for seco, o erro pode ser grande e deve portanto ser corrigido pela expressão:

$$\left(\frac{V_{mc}}{V_m}\right) = \left(\frac{P_b - (1 - UR/100) \times P_v}{P_p}\right) \times \left(\frac{T_p}{T_a}\right) \quad \text{Equação 1.1}$$

onde:

V_{mc} = volume corrigido (mL)

V_m = volume compreendido entre as marcas do bolhómetro (mL)

P_b = pressão atmosférica (mm Hg)

UR= umidade relativa do ar sendo medido (%)

P_v = pressão do vapor d'água na temperatura ambiente (mm Hg)

P_p = pressão atmosférica padrão (760 mm Hg)

T_p = temperatura padrão (298 K)

T_a = temperatura ambiente (K)

Na expressão acima, P_b , P_v e P_p devem sempre ter as mesmas unidades. A pressão de vapor d'água, P_v , é encontrada na tabela da Seção 3.0.

A ENERGÉTICA normalmente fornece bolhómetro com duas dimensões: 150 mL e 500 mL. Estes valores de V_m são determinados com uma faixa de erro de $\pm 1\%$.

Finalmente, dividindo-se V_{mc} pelo tempo cronometrado t_c , tem-se a vazão no orifício crítico para condições padrão de temperatura e pressão, válida para o local do ajuste da agulha:

$$Q_{oc} = \left(\frac{V_{mc}}{(1000)(t_c)} \right) \quad \text{Equação 1.2}$$

A expressão acima dá Q_{oc} em L/min.

Na medida do tempo de deslocamento da bolha, o usuário deve ter todo o cuidado de iniciar e parar o cronômetro exatamente quando a bolha passar respectivamente pelas linhas inferior e superior. O processo deve ser repetido, só se devendo considerar o tempo cronometrado quando a diferença entre um tempo cronometrado e o anterior for menor do que 1/100 de minuto (cerca de 0,60 segundo).

Ao se fazer a calibração de um orifício, os dados levantados devem ficar bem documentados. Recomenda-se para registro dos mesmos uma folha de calibração conforme a apresentada na Figura 1.2, contendo os seguintes parâmetros:

- Identificação do orifício
- Local e data da calibração
- Volume do bolhómetro utilizado (V_m)
- Pressão atmosférica (P_b) e temperatura ambiente (T_a) no local
- Umidade relativa do ar (UR)
- Vácuo mínimo pela Equação 2.10 (P_g)
- Leitura no vacuômetro (P_g)
- Pressão de vapor na temperatura ambiente (P_v)
- Tempo cronometrado para passagem da bolha (t_c)
- Volume deslocado corrigido (V_{mc})
- Vazão do orifício (Q_{oc})
- Nome e assinatura do responsável

Existe um método da ABNT (Ref. 6 na Seção 4.0) para a calibração da vazão pelo método da bolha de sabão, aplicável ao ajuste de orifícios críticos. Entretanto, o procedimento aqui descrito foi retirado do manual da garantia da qualidade da U.S. EPA (Ref. 1, Seção 4.0), por ser mais preciso, inclusive com a consideração da correção da pressão de vapor da bolha.

1.2 Material para o Ajuste

Para a realização do ajuste da agulha, o usuário deve contar com o seguinte equipamento:

1. Um **frasco graduado**, escolhido com a dimensão adequada para o orifício que se quer calibrar. A ENERGETICA normalmente fornece bolhómetros de 150 mL (nominal) e 500 mL (nominal), respectivamente para as medidas de SO_2 pelo método da pararrosanilina e pelo método do peróxido de hidrogênio.
2. Um **suporte universal**, para manter o frasco do bolhómetro suspenso e na vertical, e **mangueiras** flexíveis, de 1/4", para as conexões entre os componentes do sistema.
3. **Filtros de proteção** para a agulha: um, de gasolina (utilizado em motocicletas), para a retenção de gotículas d'água, e outro, de membrana, com 0,8 μm de porosidade, para a retenção de partículas finas.

FORMULÁRIO DE AJUSTE DE ORIFÍCIO CRÍTICO (CONTRA BOLHÔMETRO)			
DADOS GERAIS:			
LOCAL AJUSTE: _____		DATA AJUSTE: _____	
RESPONSÁVEL: _____			
DADOS DO ORIFÍCIO:			
N° ORIFÍCIO: _____			
DADOS DO BOLHÔMETRO:			
BOLHÔMETRO N° _____		VOL. NOMINAL: _____ mL	
VOL. MEDIDO (V _m): _____ mL		DATA ÚLTIMA CAL.: _____	
Parâmetro	Sigla	Valor	Unidade
Pressão Atmosférica	P _b		mm Hg
Pressão Atmosférica Padrão	P _p	760	mm Hg
Temperatura Ambiente	T _a		K
Temperatura Ambiente Padrão	T _p	298	K
Umidade Relativa	UR		%
Vácuo Mínimo pela Equação 2.10	P _{gm}		mm Hg
Leitura no Vacuômetro x 25,4	P _q		mmHg
Pressão de Vapor a _____ °C	P _v		mm Hg
Tempo Médio de Cronometragem	t _c		min
Volume Medido do Bolhômetro (ver Seção 1.1)	V _m		mL
Volume do Bolhômetro Corrigido pela Equação 1.2	V _{mc}		mL
Vazão no Orifício pela Equação 1.3	Q _{oc}		L/min
Cálculo de Tempo Médio de Cronometragem			
Medida	Tempo Médio Lido no Cronômetro	Conversão para Minutos	
1 ^a			
2 ^a			
3 ^a			
Média			
Equações:			
Eq. 1: $P_{gm} = 0,55 \times (P_b + 20,45)$; $P_q > P_{gm}$			
Eq. 2: $V_{mc} = V_m \times \left[\frac{P_b - (1-UR/100) \times P_v}{P_p} \right] \times (T_p / T_a)$			
Eq. 3: $Q_{oc} = V_{mc} / (1.000 \times t_c)$			

FIGURA 1.2

**FORMULÁRIO DE CALIBRAÇÃO DO ORIFÍCIO CRÍTICO CONTRA UM BOLHÔMETRO
(DETERMINAÇÃO DA VAZÃO CRÍTICA)**

4. Um **sistema de suporte da agulha**, especial, de inox ou de vidro, para encaixe da agulha, com extremidades apropriadas para conexão com a mangueira que vem do sistema de proteção filtros) da agulha e com a que vai para a bomba. Quando devidamente instalada no circuito, a ponta da agulha fica voltada para a bomba.
5. Uma **bomba a vácuo** capaz de prover o vácuo necessário para as vazões em consideração. A bomba deve ser provida de uma mangueira flexível de 1/4", com comprimento suficiente para conectar-se com a extremidade posterior do orifício. Recomenda-se não usar mangueira muito flexível, pois pode achatarse sob vácuo alto. A bomba deve também ser provida de um **vacuômetro**, para se checar o vácuo a jusante do orifício.
6. Um **bécher**, de 250 mL, para se colocar a solução de água e sabão.
7. Um **cronômetro**, com 0,01 min (centésimo de minuto) de precisão, para as medidas dos tempos de deslocamento das bolhas.
8. Um **higrômetro**, para as medidas de umidade relativa.
9. Um **barômetro**, devidamente calibrado, com divisão mínima de 1 mm Hg (um milímetro de mercúrio), para fornecimento da pressão barométrica no ambiente em que se está realizando a calibração. Caso não possua um barômetro, o usuário pode obter a pressão de uma estação meteorológica próxima e confiável.
10. Um **termômetro**, de mercúrio, devidamente calibrado, com divisão mínima de 1 K (um grau Kelvin), para fornecimento da temperatura no ambiente onde está sendo feita a calibração.
11. **Tabela de pressão de vapor**, com os respectivos valores da pressão de vapor da água para cada temperatura. Ver tabela na Seção 3.0.
12. Um **alicate de bico** ou uma **mossa**, para ajuste da vazão da agulha para a faixa requerida.
13. Folhas de **Formulário de Calibração** do orifício

1.3 Montagem do Equipamento

O sistema para o ajuste da agulha é representado pelo esquema da Figura 1.1.

Sabendo-se qual a vazão requerida para a agulha, escolhe-se o bolhometro. O frasco é fixado no suporte universal, em posição vertical, com a extremidade afilada para cima. A outra extremidade deve ficar a uma certa altura com relação à base suficiente para que se possa inserir o bécher com água e sabão por baixo.

As conexões entre os componentes podem ser com mangueira flexível; por exemplo, de PVC ou de silicone. O filtro automotivo deve ficar após o frasco do bolhometro, pois sua finalidade é impedir que bolhas, gotículas ou névoa atinjam o filtro membrana ou mesmo a agulha.

Quanto à agulha, é encaixada no suporte de tal modo que sua ponta fique para o lado a jusante (lado da bomba de vácuo) de sua base. O encaixe deve ser o mais cuidadoso possível, a fim de impedir entrada falsa de ar no sistema.

Tampe a entrada do sistema e pince a mangueira entre a bomba e o vacuômetro. Ligue a bomba e deixe-a funcionar até que o vácuo se estabilize. Em seguida, desligue-a e verifique então se a leitura no vacuômetro se altera. Caso se altere, é porque há entrada falsa de ar no sistema, da entrada ao vacuômetro. Localize os pontos de entrada falsa de ar e elimine-os. Em seguida, remova a pinça da mangueira.

Ligue novamente a bomba e compare a leitura do vacuômetro (P_g) com o valor calculado pela expressão $0,55 (P_b + 20,45)$ mm Hg, onde a pressão atmosférica P_b é lida com o barômetro. P_g tem que ser igual ou maior do que valor calculado pela expressão; caso contrário, só pode estar acontecendo uma ou mais das três possibilidades: entrada falsa de ar entre o orifício crítico e a bomba ou na própria bomba; o orifício a ser calibrado tem dimensão alta demais; a bomba perdeu força por alguma razão. Cabe então checar as possibilidades acima.

Prepare a solução de água com sabão e coloque-a no bécher de 250 mL.

Antes de instalar o bolhometro no suporte, recomenda-se lavar a parede interior o interior do frasco (pode ser com água da bica), lubrificando-a para melhor movimentação das bolhas.

Com o sistema devidamente montado, sem entrada falsa de ar e com a bomba mantendo as condições críticas, parte-se então para o ajuste e determinação da vazão.

1.4 Procedimento de Preparação

1. Anote, no formulário de ajuste (Figura 1.2), os dados iniciais, ou sejam: identificação da agulha, local e data da calibração, dados do bolhometro, a pressão atmosférica (P_b) e a temperatura ambiente (T_a).
2. Ligue a bomba e espere uns cinco minutos, até o sistema estabilizar-se.
3. Segurando o bécher com a água e sabão com a mão, mova-o por baixo da boca inferior do tubo do bolhometro e levante-o lentamente até que a superfície da água toque na borda da boca. Formam-se bolhas, que sobem pelo interior do tubo. Algumas se rompem logo. Espere até que todas estejam subindo normalmente.
4. Consulte a tabela de vapor de pressão (Seção 3.0) e obtenha o valor da pressão de vapor (P_v) correspondente à temperatura ambiente (T_a).
5. Anote, no formulário de calibração, o valor do vácuo mínimo (P_{gm}), calculado por $0,55 (P_b + 20,45)$. Compare P_{gm} com a leitura do vacuômetro P_g . P_g tem que ser igual ou maior do que P_{gm} . Anote também o valor de P_g .

6. Aproxime então o bécher da extremidade inferior do frasco do bolhómetro, deixando subir apenas uma bolha. Dispare o cronómetro no momento em que a bolha atingir o primeiro traço de aferição (Volume 0) e pare-o no momento em que a bolha atingir o traço final de aferição (volume de deslocamento ou volume aferido do bolhómetro).
7. Repita o Passo 6 por duas vezes e anote o tempo médio de cronometragem (t_c). As três leituras não devem diferir em mais de 1/100 de segundo uma da outra. Anote t_c no formulário.
8. Anote o volume aferido do bolhómetro (V_m) e calcule o volume deslocado no bolhómetro (V_{mc}) pela Equação 1.1.
9. Calcule a vazão do orifício crítico (Q_{oc}) pela Equação 1.2. Anote o resultado no formulário.
10. Caso a vazão esteja abaixo da desejada, substitua a agulha por uma outra de maior orifício. Ao contrário, caso a vazão for maior do que a desejada, dê, com o alicate de bico ou a mocha, alguns apertos na ponta da agulha até que se atinja a faixa de vazão adequada.

2.0 PRINCÍPIO DO ORIFÍCIO CRÍTICO

Quando um gás, fluindo através de um orifício crítico, alcança a velocidade do som, o quociente das pressões a jusante e a montante do orifício, P_{abs_j}/P_{abs_m} , passa a ser denominado "quociente crítico de pressões" e é dado por:

$$\left(\frac{P_{abs_j}}{P_{abs_m}} \right)_{Crit} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad \text{Equação 2.1}$$

onde:

P_{abs_j} = pressão absoluta a jusante do orifício
 P_{abs_m} = pressão absoluta a montante do orifício
 k = relação de calores específicos do gás

Como estamos lidando com poluição atmosférica, o gás que flui no orifício é praticamente o ar. Sendo assim, à pressão atmosférica ($k = 1,4$, para o ar) a equação acima se reduz a:

$$\left(\frac{P_{abs_j}}{P_{abs_m}} \right)_{Crit} = 0,53 \quad \text{Equação 2.2}$$

A partir desse valor, ainda que se diminua a pressão a jusante, a pressão no orifício continua sendo P_{abs_j} , dada pela equação acima. Assim, a vazão se mantém com um valor máximo constante, sendo então chamada de "vazão crítica".

Teoricamente, portanto, a vazão se mantém crítica enquanto a relação de pressões seja satisfeita pela expressão:

$$\left(\frac{P_{abs_j}}{P_{abs_m}} \right)_{Crit} \leq 0,53 \quad \text{Equação 2.3}$$

Cabe salientar que enquanto valer a relação acima, a vazão, para um certo orifício crítico, fica dependendo apenas da pressão e da temperatura a montante do orifício, conforme confirmado pela equação de Fliegner (tomada do Manual do Engenheiro Químico de Perry - ver Ref. 8 na Seção 4.0) abaixo:

$$W = 0,528 \frac{C_v S_2 P_{abs_m}}{T_m} \quad \text{Equação 2.4}$$

onde:

- W = vazão mássica (lb/s)
- C_v = coeficiente de velocidade
- S₂ = seção do orifício (ft²)
- P_{abs_m} = pressão absoluta a montante (lb/in²)
- T_m = temperatura absoluta a montante (graus Rankine)

Na prática, reduz-se o valor condicionante da Equação 2.3 de 0,53 para 0,45 (ver Ref. 7 na Seção 4.0), de modo que as novas condições passam para:

$$\left(\frac{P_{abs_j}}{P_{abs_m}} \right) \leq 0,45 \quad \text{Equação 2.5}$$

Isto significa que se está trabalhando com mais segurança, muito embora se passe para condições mais severas.

Como as condições acima são para condições atmosféricas normais (760 mm Hg/29,92 in Hg),

$$P_{abs_j} \leq 342 \text{ mm Hg}/13,5 \text{ in Hg} \quad \text{Equação 2.6}$$

Num aparelho como o TRIGÁS, o orifício crítico é sempre posicionado após o sistema de retenção de poluentes e de filtros de proteção, de modo que P_{abs_m} é sempre menor que a pressão atmosférica (P_b, medida com um barômetro). Assume-se, da experiência, que:

$$P_{abs_m} = P_b - 25 \text{ mmHg} \quad \text{Equação 2.7}$$

Na prática, mede-se P_{abs_j} por meio de um vacuômetro. No TRIGÁS, o vacuômetro é localizado entre o orifício e a bomba. Chamando a medida do "vácuo" no vacuômetro de P_g, tem-se:

$$P_{abs_j} = P_b - P_g \quad \text{Equação 2.8}$$

Substituindo as expressões de P_{abs_m} e P_{abs_j} logo acima na expressão das condições para vazão crítica, tem-se:

$$\left(\frac{P_{abs_j}}{P_{absm}}\right) = \left(\frac{P_b - P_g}{P_b - 25\text{mmHg}}\right) \leq 0,45 \quad \text{Equação 2.9}$$

Rearranjando, tem-se para a leitura no vacuômetro:

$$P_g \geq 0,55 (P_b + 20,45) \text{ mm Hg} \quad \text{Equação 2.10}$$

Para um local ao nível do mar, isto significa que tem-se vazão crítica enquanto o vácuo (P_g) for maior ou igual a 429 mm Hg.

A bomba utilizada no TRIGÁS é dimensionada para manter este vácuo com uma vazão total (nos três frascos-borbulhadores) de até 4 L/min aproximadamente.

Conforme já se viu na Equação de Fliegner acima (Equação 2.4), a vazão num certo orifício é função direta da pressão a montante do orifício. Sendo assim, deduz-se que a vazão se reduz à medida que o orifício for utilizado a alturas mais altas com relação ao nível do mar. Por esta razão, deve-se ficar atento às necessidades de recalibração ou de correções de pressões quando se utilizar um orifício em alturas diferentes daquela onde ele foi previamente calibrado.

Os dados de calibração fornecidos inicialmente com o TRIGÁS são normalmente para condições padrão de temperatura e pressão. Entretanto, ao utilizar o orifício fornecido pela ENERGÉTICA, o usuário fica na obrigação de duas coisas: recalibrar o orifício no local de amostragem ou tomar a vazão calculada pela ENERGÉTICA e corrigi-la para as condições locais pela relação $[(P_1/P_2) (T_2/T_1)]^{1/2}$, onde P_1 e T_1 são a pressão atmosférica (mm Hg) e a temperatura ambiente (K) medidas no local da calibração do orifício e P_2 e T_2 são a pressão atmosférica (mm Hg) e a temperatura ambiente (K) medidas no local de amostragem.

Finalmente, o usuário deve ficar atento para a variação do vácuo mínimo para condições críticas com a altura em relação ao nível do mar. A Tabela 2.1 apresenta valores desse vácuo mínimo, calculados pela expressão $0,55 (P_b + 20,45)$, em mm Hg, para várias alturas em relação ao nível do mar.

TABELA 2.1

VÁCUO MÍNIMO NECESSÁRIO PARA CONDIÇÕES CRÍTICAS

ELEVAÇÃO (m)	PRESSÃO ATMOSFÉRICA (P_b) (mm Hg)	VÁCUO MÍNIMO PARA CONDIÇÕES CRÍTICAS (P_g) (mm Hg)
0	760	429
200	742	419
500	716	405
1000	672	381
1500	628	357

Para maiores detalhes sobre o uso de agulhas hipodérmicas como orifício crítico em amostragem de ar, recomendamos consultar a Ref. 7 na Seção 4.0.

3.0 TABELA DA PRESSÃO DE VAPOR DA ÁGUA

TABELA DA PRESSÃO DE VAPOR DA ÁGUA (mm Hg)

Temp. °C	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	4,579	4,613	4,647	4,681	4,715	4,750	4,785	4,820	4,855	4,890
1	4,926	4,962	4,998	5,034	5,070	5,107	5,144	5,181	5,219	5,258
2	5,294	5,332	5,370	5,408	5,447	5,488	5,525	5,565	5,605	5,645
3	5,685	5,725	5,766	5,807	5,848	5,889	5,931	5,973	6,015	6,058
4	6,101	6,144	6,187	6,230	6,274	6,318	6,363	6,408	6,453	6,498
5	6,543	6,580	6,635	6,681	6,728	6,775	6,822	6,869	6,917	6,965
6	7,013	7,062	7,111	7,160	7,209	7,259	7,309	7,360	7,411	7,462
7	7,513	7,565	7,617	7,669	7,722	7,775	7,828	7,882	7,936	7,990
8	8,045	8,100	8,155	8,211	8,267	8,323	8,380	8,437	8,494	8,551
9	8,609	8,668	8,727	8,786	8,845	8,905	8,965	9,025	9,086	9,147
10	9,209	9,201	9,333	9,395	9,458	9,521	9,585	9,649	9,714	9,776
11	9,844	9,910	9,976	10,042	10,109	10,176	10,244	10,312	10,380	10,449
12	10,518	10,588	10,658	10,728	10,799	10,870	10,941	11,013	11,085	11,158
13	11,231	11,305	11,379	11,453	11,528	11,604	11,680	11,756	11,833	11,910
14	11,987	12,065	12,144	12,223	12,302	12,382	12,462	12,543	12,624	12,706
15	12,788	12,870	12,953	13,037	13,121	13,205	13,290	13,375	13,461	13,547
16	13,634	13,721	13,809	13,898	13,987	14,076	14,168	14,256	14,347	14,438
17	14,530	14,622	14,715	14,809	14,903	14,997	15,092	15,188	15,284	15,380
18	15,477	15,575	15,673	15,772	15,871	15,971	16,071	16,171	16,272	16,374
19	16,477	16,581	16,685	16,789	16,894	16,999	17,105	17,212	17,319	17,427
20	17,535	17,644	17,863	17,863	17,974	18,085	18,197	18,309	18,422	18,536
21	18,650	18,765	18,880	18,996	19,113	19,231	19,349	19,468	19,587	19,707
22	19,827	19,948	20,070	20,193	20,316	20,440	20,565	20,690	20,815	20,941
23	21,068	21,169	21,324	21,453	21,583	21,714	21,845	21,977	22,110	22,243
24	22,377	22,512	22,648	22,785	22,922	23,060	23,198	23,337	23,476	23,616
25	23,756	23,897	24,039	24,182	24,326	24,471	24,617	24,764	24,912	25,060
26	25,209	25,359	25,509	25,660	25,812	25,964	26,117	26,271	26,426	26,582
27	26,039	26,897	27,055	27,214	27,374	27,535	27,696	27,858	28,021	28,185
28	28,349	28,514	28,680	28,847	29,015	29,184	29,354	29,525	29,697	29,870
29	30,043	30,217	30,392	30,568	30,745	30,923	31,102	31,281	31,461	31,642
30	31,824	32,007	32,191	32,376	32,561	32,747	32,934	33,122	33,312	33,503
31	33,695	33,888	34,082	34,276	34,471	34,667	34,864	35,062	35,261	35,462
32	35,663	35,865	36,068	36,272	36,477	36,683	36,891	37,099	37,308	37,518
33	37,729	37,942	38,155	38,369	38,584	38,801	39,018	39,237	39,457	39,677
34	39,898	40,121	40,344	40,569	40,796	41,023	41,251	41,480	41,710	41,942

TABELA DA PRESSÃO DE VAPOR DA ÁGUA (mm Hg) (continuação)

Temp. °C	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
35	42,175	42,409	42,644	42,880	43,117	43,355	43,595	43,836	44,078	44,320
36	44,563	44,808	45,054	45,301	45,549	45,799	46,050	46,302	46,556	46,811
37	47,067	47,342	47,582	47,841	48,102	48,364	48,627	48,891	49,157	49,424
38	49,692	49,961	50,231	50,502	50,774	51,048	51,323	51,600	51,879	51,160
39	52,442	52,725	53,009	53,294	53,580	53,867	54,156	54,446	54,737	55,030
40	55,342	55,810	55,910	56,210	56,510	56,810	57,110	57,410	57,720	58,030
41	58,340	58,650	58,960	59,270	59,580	59,900	60,220	60,540	60,860	61,180
42	61,500	61,820	62,140	62,470	62,800	63,130	63,460	63,790	64,120	64,460
43	64,800	65,140	65,480	65,820	66,160	66,510	66,860	67,210	67,560	67,910
44	68,260	68,610	68,970	69,330	69,690	70,050	70,410	70,770	71,140	71,510
45	71,880	72,250	72,620	72,990	73,360	73,740	74,120	74,500	74,880	75,260
46	75,650	76,040	76,430	76,820	77,210	77,600	78,000	78,400	78,800	79,200
47	79,600	80,00	80,410	80,820	81,230	81,640	82,050	82,460	82,870	83,290
48	83,710	84,130	84,990	84,990	85,420	85,850	86,580	86,710	87,140	87,580
49	88,020	88,460	89,340	89,340	89,790	90,240	90,690	91,140	91,590	92,050
50	92,510	97,200	102,090	107,200	112,510	118,040	123,800	129,820	136,080	142,600
60	149,380	156,430	163,770	171,380	179,310	187,540	196,090	204,960	214,170	223,730
70	233,700	243,900	254,600	265,700	277,200	289,100	301,400	314,100	327,300	341,000
80	355,100	369,700	384,900	400,600	416,800	433,600	450,900	468,700	487,100	506,100
90	525,760	527,760	529,770	531,780	535,820	535,820	537,860	539,900	541,950	544,000
91	546,050	548,110	550,180	552,260	556,440	556,440	558,530	560,640	562,750	564,870
92	566,990	569,120	571,260	573,400	577,710	577,710	579,870	582,040	584,220	586,410
93	588,600	590,800	593,000	595,210	599,660	599,660	601,890	604,130	606,380	608,640
94	610,900	613,170	615,440	617,720	620,010	622,310	624,610	626,920	629,240	631,570
95	633,900	636,240	638,590	640,940	643,670	645,670	648,050	650,430	652,820	655,220
96	657,920	660,030	662,450	664,880	667,310	689,750	672,200	674,660	677,120	679,690
97	682,070	684,550	687,040	689,540	692,050	694,570	697,100	698,630	702,170	704,710
98	707,270	709,830	712,400	714,980	717,560	720,150	722,750	725,360	727,980	730,610
99	733,240	735,880	738,530	741,180	743,850	746,520	749,200	751,890	754,580	757,290
100	760,000	762,720	785,450	768,190	770,930	773,680	776,440	779,220	782,000	784,780
101	787,570	790,370	793,180	796,000	798,820	801,660	804,500	807,350	801,210	813,080

4.0 REFERÊNCIAS

1. U.S. EPA. Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurements Systems, Volume II, Ambient Air Specific Methods. EPA-600/4-77-027a, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina 27711, 1977.
2. U.S. EPA. - Reference Method for the Determination of Sulfur Dioxide in the Atmosphere (Pararosaniline Method). 40 CFR 50, Appendix A, Section 2.1.11, Jan., 1983.
3. ABNT. Ar atmosférico - Determinação da Concentração de Dióxido de Enxofre pelo Método da Pararosanilina. NBR 9546, Set., 1986.
4. ABNT. Ar atmosférico - Determinação da Concentração de Dióxido de Enxofre pelo Método do Peróxido de Hidrogênio. NBR 12979, Set., 1993.
5. Methods of Air Sampling and Analysis. Third Edition. James P. Lodge, Jr. (Editor), Intersociety Committee, Lewis Publishers, Inc., 1989.
6. ABNT. Calibração de Vazão, pelo Método da Bolha de Sabão, de Bombas de baixa Vazão Utilizadas na Avaliação de Agentes Químicos no Ar. NBR 10562, Dez., 1988.
7. James P. Lodge, Jr., John B. Plate, Blair E. Ammons and Glenda A. Swanson. "The Use of Hypodermic Needles as Critical Orifices in Air Sampling". Journal of the Air Pollution Control Association, 16(4); 197--200; April 1966.
8. R.H. Perry and D.W. Green. Perry's Chemical Engineers Handbook. McGraw-Hill, 1997.
9. José W. Dias. Manual de Operação do APV TRIGÁS - Amostrador de Pequeno Volume para a Coleta de Até três Gases. Energética; Rio de Janeiro; Rev. 02; 26/11/2001.