



**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) 3797-9800; Fax: (0xx21) 3797-9830  
[www.energetica.ind.br](http://www.energetica.ind.br)

# CALIBRAÇÃO DO GASÔMETRO POR MEIO DE ORIFÍCIOS CRÍTICOS

## MANUAL

| ÍNDICE |   |   |
|--------|---|---|
| 1.0    | INTRODUÇÃO                                      | 1 |
| 2.0    | ORIFÍCIO CRÍTICO                                | 1 |
| 3.0    | SELEÇÃO DOS ORIFÍCIOS CRÍTICOS                  | 2 |
| 4.0    | CAIXA MEDIDORA                                  | 3 |
| 5.0    | TESTE DE VAZAMENTO DA CAIXA MEDIDORA            | 4 |
| 6.0    | CALIBRAÇÃO DA CAIXA MEDIDORA                    | 4 |
| 7.0    | CALIBRAÇÃO DOS ORIFÍCIOS CRÍTICOS               | 4 |
| 8.0    | CALIBRAÇÃO DE GASÔMETROS COM ORIFÍCIOS CRÍTICOS | 7 |

**Responsável:**

José Walderley Coêlho Dias

**ENERGÉTICA - RIO DE JANEIRO**

**Data desta versão: 10/04/06**  
**(Obs.: esta versão altera texto de 18/08/98)**

## 1.0 INTRODUÇÃO

Este manual descreve o método de calibração do gasômetro por meio de orifícios críticos previamente calibrados.

O método aplicado a gasômetros utilizados em coletores isocinéticos de poluentes atmosféricos (CIPA), construídos segundo o método 5 da EPA, está descrito formalmente na Seção 7 do 40 CFR Ch I (7-1-90 edition), Pt. 60, App. A, páginas 705 a 709.

O gasômetro de um CIPA tem sido tradicionalmente calibrado contra um medidor de gás úmido (wet test meter). Entretanto, há a alternativa de calibração por meio de orifícios críticos, bastando, para isso, que sejam selecionados, calibrados e usados de maneira adequada, conforme descrito neste manual.

Na calibração de orifícios críticos, é fundamental o uso de um sistema, comumente denominado de Caixa Medidora, contendo, como componente primordial, um medidor de gás seco (gasômetro), seja para calibrar os orifícios críticos, seja para ser calibrado por orifícios críticos previamente calibrados, bem como de uma bomba de vácuo, a mais potente possível.

A Caixa Medidora muito se parece com a unidade de controle do CIPA, podendo, na realidade, ser substituída por esta para a calibração de orifícios críticos ou de gasômetros.

Para um serviço completo, o usuário terá que contar com:

- Um barômetro;
- Um termômetro;
- Um cronômetro;
- Vários orifícios críticos;
- Uma Caixa Medidora (com gasômetro);
- Uma bomba de vácuo.

## 2.0 ORIFÍCIO CRÍTICO

O procedimento que se segue descreve o uso de agulha hipodérmica ou de tubo capilar de aço inox como orifício crítico.

Num orifício crítico, quando o gás na “vena contracta” alcança a velocidade do som, o quociente  $P_2/P_1$  passa a ser denominado “quociente crítico de pressões” e é dado por:

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k+1}} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

onde:

- $P_2$  = pressão a jusante da “vena contracta”
- $P_1$  = pressão a montante da “vena contracta”
- $k$  = relação de calores específicos do gás

Como para o ar à pressão atmosférica,  $k = 1,4$ , a equação acima se reduz a:

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = 0,53 \quad (\text{Eq. 2.2})$$

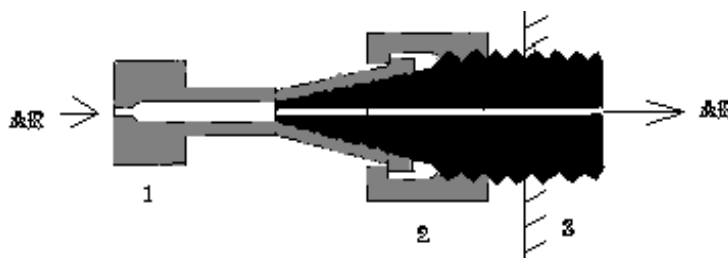
A partir desse valor, ainda que se diminua a pressão a jusante, a pressão na “vena contracta” continua sendo  $P_2$ , dada pela equação acima. Assim, a vazão se mantém com um valor máximo constante, sendo então chamada de “vazão crítica”.

### 3.0 SELEÇÃO DOS ORIFÍCIOS CRÍTICOS

Deve-se selecionar cinco orifícios críticos, dimensionados de tal forma a cobrir a faixa de vazões entre 10 e 34 L/min ou de vazões previstas. Dois destes orifícios devem encerrar a faixa de operação prevista.

Será necessário um mínimo de três orifícios para calibrar um gasômetro que satisfaça o Método 5. Os outros dois ficam como sobressalentes, para uso caso se queira uma cobertura mais apropriada das vazões de operação.

Os orifícios podem ser adaptados para uso num CIPA, simplesmente acoplando-os à fêmea do engate rápido correspondente à entrada de gases na unidade de controle do aparelho. Ver Figura 3.1.



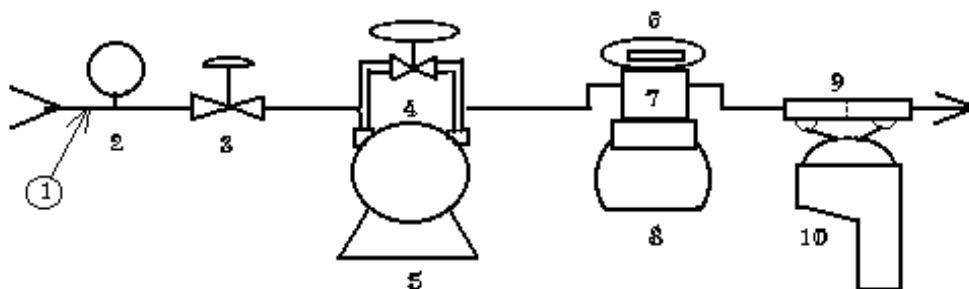
- 1- Orifício Crítico
- 2 - Engate Rápido Cônico
- 3 - Painel da Unidade de Controle do CIPA

**Figura 3.1** Croqui de um Orifício Crítico instalado no painel da Unidade de Controle por meio de engate rápido

### 4.0 CAIXA MEDIDORA

A Caixa Medidora, tanto para calibrar orifícios críticos contra um gasômetro previamente calibrado, como para calibrar gasômetros contra orifícios críticos previamente calibrados, é parecida com a Unidade de Controle do CIPA e contém os seguintes componentes principais montados segundo o croqui da Figura 4.1:

A Caixa Medidora possui, no seu painel, uma entrada para gases, com um pino para engate rápido semelhante ao da Unidade de Controle do CIPA. É neste pino que se engata a fêmea do Orifício Crítico.



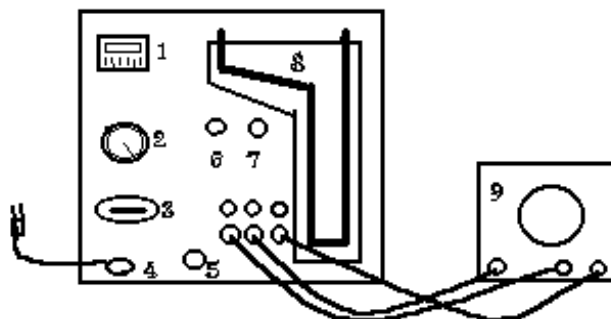
- |                             |                            |                                 |
|-----------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| 1 - Linha de vácuo          | 4 - Válvula de ajuste fino | 7 - Termopar do gasômetro       |
| 2 - Vacuômetro              | 5 - Bomba com boa vedação  | 8 - Gasômetro                   |
| 3- Válvula de ajuste grosso | 6 - Leitor de temperatura  | 9 - Placa de orifício calibrado |
|                             |                            | 10 - Manômetro inclinado        |

**Figura 4.1** Esquema da Caixa Medidora

A Caixa Medidora e a bomba são interligadas através de um “umbilical” enfeixando duas mangueiras de passagem de gases e um cabo de força.

No painel da Caixa Medidora só são visíveis o indicador de temperatura, o vacuômetro, o mostrador do gasômetro, as válvulas de ajuste grosso e fino e o manômetro inclinado. Os termopares do gasômetro e a placa de orifício ficam dentro da caixa.

Ver croqui da Caixa Medidora, com a bomba de vácuo, na Figura 4.2.



- |                              |   |                            |
|------------------------------|---|----------------------------|
| 1 - Indicador de temperatura | 4 - Entrada de força                            | 7 - Válvula de ajuste fino |
| 2 - Vacuômetro               | 5 - Engate p/ acoplamento do calibrador crítico | 8 - Manômetro inclinado    |
| 3 - Gasômetro                | 6 - Válvula de ajuste grosso                    | 9 - Bomba de vácuo         |

**Figura 4.2** Painel da Caixa Medidora e a Bomba de Vácuo

## 5.0 TESTE DE VAZAMENTO DA CAIXA MEDIDORA

Deve-se, antes de usar a Caixa Medidora, verificar se não há vazamento no sistema. Proceder então conforme os passos abaixo:

- Abrir completamente a válvula de ajuste grosso, ao mesmo tempo fechando completamente a válvula de ajuste fino.
- Fechar a entrada.

- Ligar a bomba e verificar se não há vazamento. Considera-se que não há vazamento quando não ocorrer qualquer movimento no mostrador do gasômetro no decorrer de 1 minuto.

Deve-se verificar também se não há vazamento entre a bomba e a placa de orifício. Com a bomba vazando, lê-se um volume menor do que o que está sendo amostrado. Recomenda-se o seguinte procedimento para detectar se há vazamento:

- Fechar a válvula de ajuste grosso.
- Inserir no tubo de saída da placa de orifício uma rolha de borracha com um furo conectado a uma mangueira de borracha.
- Desconectar a mangueira da parte baixa do manômetro e deixar a abertura livre.
- Fechar o espigão a jusante da placa de orifício - o que antes recebia a mangueira da parte baixa do manômetro.
- Soprando através da mangueira de borracha, pressurizar o sistema até atingir 13 a 18 cm de coluna d'água.
- Pinçar a mangueira e observar o manômetro por um minuto.
- Verificar se há perda de pressão no manômetro. Se isso ocorrer, é porque há vazamento na caixa.

Caso haja vazamento na caixa, deve-se verificar se não há juntas gastas, conexões frouxas, o-rings gastos, etc. e efetuar os reparos necessários.

## 6.0 CALIBRAÇÃO DA CAIXA MEDIDORA

Após a verificação de que não há vazamento na Caixa Medidora, efetua-se a calibração da mesma, com um wet test meter ou com um espirômetro, conforme manda a norma.

Da calibração da Caixa Medidora resulta a determinação do fator Y do gasômetro e do fator  $\Delta H@$  da placa de orifício.

## 7.0 CALIBRAÇÃO DOS ORIFÍCIOS CRÍTICOS

Os orifícios críticos devem ser calibrados na mesma configuração em que são usados, isto é, não deve haver nenhuma obstrução ou conexão na entrada do orifício.

Para calibração dos orifícios, deve-se seguir os passos abaixo:

- Preparar a Caixa Medidora, conectando-a a uma bomba a vácuo.
- Engatar, no pino de engate localizado no painel da Caixa Medidora, o orifício crítico que se quer calibrar.
- Aquecer a caixa por 15 minutos. Isto é importante a fim de equilibrar as condições de temperatura através do gasômetro.
- Checar se não há vazamento no sistema conforme a Seção 5.0.
- Antes de calibrar o orifício, determinar se é de dimensão adequada e se o vácuo com ele é apropriado. Seguir os passos abaixo:
  - a) Ligar a bomba.

- b) Abrir completamente a válvula de ajuste grosso e em seguida girar a válvula de ajuste fino até que o vácuo lido no vacuômetro seja aproximadamente a metade da pressão atmosférica.
  - c) Observar a depressão  $\Delta H$  no manômetro inclinado.
  - d) Lentamente aumentar o vácuo até obter uma leitura estável no manômetro.
  - e) Registrar o vácuo crítico para cada orifício.
  - f) Rejeitar orifícios que não atinjam valor crítico.
- Obter a pressão barométrica usando um barômetro. Registrar a pressão barométrica,  $P_b$ , em mmHg.
  - Realizar rodadas duplas em vácuo de 2,5 a 5,0 cm Hg (1 a 2 pol Hg) acima do vácuo crítico. As rodadas devem ser de pelo menos 5 minutos cada. A indicação do volume no gasômetro deve ser em incrementos de 0,2 L. Como orientação, os tempos não devem diferir em mais de 3,0 segundos (incluindo tempo para mudança nas temperaturas do gasômetro), a fim de se conseguir  $\pm 0,5\%$  em  $K'$ . Registrar os dados listados na Figura 7.1.
  - Calcular  $K'$  usando-se a Equação 7.1.

$$K' = \frac{K_1 V_g Y \left( P_b + \frac{\Delta H}{13,6} \right) \sqrt{T_a}}{P_b T_g \theta} \quad (\text{Eq. 7.1})$$

onde:

$K'$  = coeficiente do orifício crítico,  $\frac{(L)(\sqrt{K})}{(mmHg)(min)}$

$K_1 = 0,3858 \frac{(K)}{(mmHg)}$

$V_g$  = Volume totalizado no gasômetro (não corrigido), L

$Y$  = Fator do gasômetro (já conhecido)

$P_b$  = Pressão barométrica, mm Hg

$\Delta H$  = Leitura no manômetro, mm H<sub>2</sub>O

$T_a$  = Temperatura ambiente, K

$T_g$  = Temperatura média no gasômetro, K

$\theta$  = Duração da rodada, min

- Tirar a média dos valores de  $K'$ . Os valores de cada  $K'$  não devem diferenciar em mais  $\pm 0,5\%$  com relação à média.
- Calcular a vazão do orifício crítico,  $Q_{cp}$ , em condições padrão, usando a Equação 7.2.

$$Q_{cp} = \frac{K' P_b}{\sqrt{T_a}} \quad (\text{Eq. 7.2})$$

- Tirar a média de  $Q_{cp}$  para as duas rodadas. Obtém-se  $Q_{cpm}$ .

| CALIBRAÇÃO ORIFÍCIO CRÍTICO CONTRA GASÔMETRO  |                     |                  |        |
|---|---------------------|------------------|--------|
| ORIFÍCIO CRÍTICO N° CCP-16  |                     |                  |        |
| GASÔMETRO: TECNOBRÁS  |                     | FATOR Y: 1,00746 |        |
| NÚMERO: C-08/96/28MSGT  |                     |                  |        |
| PARÂMETROS/VARIÁVEIS  | UNIDADE             | RODADA           |        |
|   |                     | 1                | 2      |
| <b>Leituras no gasômetro:</b>   |                     |                  |        |
| • Inicial, $V_i$  | L                   | 17777            | 17901  |
| • Final, $V_f$  | L                   | 17827            | 17951  |
| • Diferença, $V_g$  | L                   | 50               | 50     |
| <b>Temperatura no gasômetro:</b>  |                     |                  |        |
| • Entrada, $T_e$  | K                   | 293              | 294    |
| • Saída, $T_s$  | K                   | 293              | 293    |
| • Média, $T_g$  | K                   | 293              | 293,5  |
| Duração da rodada, t  | min                 | 3,212            | 3,216  |
| Leitura no manômetro, $\Delta H$  | mm H <sub>2</sub> O | 30,0             | 30,0   |
| Leitura no vacuômetro   | cm Hg               | 52               | 52     |
| Pressão barométrica, $P_b$  | mm Hg               | 763,41           | 763,41 |
| Temperatura ambiente, $T_a$   | K                   | 297,8            | 299,2  |
| Fator $K'$ (*)  |                     | 0,3547           | 0,3545 |
| Média dos Fatores $K'$  |                     | 0,3546           |        |
| Vazão no Orifício, $Q_c$ (**)   | L/min               | 15,691           | 15,646 |
| Vazão média, $Q_{cm}$ (**)  | L/min               | 15,669           |        |
| $(*) \quad K' = \frac{K_1 V_g Y \left( P_b + \frac{\Delta H}{13,6} \right) \sqrt{T_a}}{P_b T_g \theta} \text{ em } \frac{(L)(\sqrt{K})}{(mmHg)(min)}$ |                     |                  |        |
| $(**) \text{ Para condições padrão } (P_p = 760 \text{ mmHg}; T_p = 293,16 \text{ K}): \quad Q_{cp} = \frac{K' P_b}{\sqrt{T_a}} \text{ em L/min}$     |                     |                  |        |
| LOCAL: ENERGÉTICA/RIO   | DATA: 03/06/97      |                  |        |
| REALIZADA POR: Angela Regina Trindade   |                     |                  |        |
| SUPERVISIONADA POR: Walderley Dias  |                     |                  |        |

FIGURA 7.1 Folha de dados para determinação do Fator  $K'$  do orifício crítico (com exemplo)

#### OBSERVAÇÕES:

- O fator de multiplicação,  $K_1$ , de 0,3858 (K)/(mm Hg), é obtido dividindo-se a temperatura nas condições padrão para amostragem em chaminé (20 °C  $\equiv$  293,16 K) pela pressão barométrica nas condições padrão (760 mm Hg). Com a inclusão de  $K_1$ , os valores dos volumes que passam no orifício e no gasômetro são automaticamente corrigidos para as condições padrão de 20 °C e 760 mm Hg.

## 8.0 CALIBRAÇÃO DE GASÔMETROS COM ORIFÍCIOS CRÍTICOS

Seguir os passos abaixo:

- Usar orifícios críticos - no mínimo três - calibrados conforme o procedimento apresentado na Seção 7.0.
- Usar a folha da Figura 8.1 (com exemplo de calibração com três calibradores críticos), para registro dos dados.
- Registrar a pressão barométrica,  $P_b$ , e a temperatura ambiente,  $T_a$ .
- Calcular, para cada orifício crítico, os volumes, em condições padrão de temperatura e pressão, de ar passados no gasômetro,  $V_{gp}$ , e nos orifícios críticos,  $V_{cp}$ , e calcular o fatores de calibração,  $Y$ , do gasômetro, usando as equações abaixo: Para cada orifício, fazer duas rodadas.

$$V_{gp} = K_1 V_g \frac{P_b + \frac{\Delta H}{13,6}}{T_g} \quad (\text{Eq. 8.1})$$

$$V_{cp} = \frac{K' P_b \theta}{\sqrt{T_a}} \quad (\text{Eq. 8.2})$$

$$Y = \frac{V_{cp}}{V_{gp}} \quad (\text{Eq. 8.3})$$

onde:

$V_{gp}$  = Volume de gás passado no gasômetro, corrigido para condições padrão, L

$$K_1 = 0,3858 \frac{(K)}{(mmHg)}$$

$V_g$  = Volume totalizado no gasômetro (não corrigido), L

$P_b$  = Pressão barométrica, mm Hg

$\Delta H$  = Leitura no manômetro, mm H<sub>2</sub>O

$T_g$  = Temperatura média no gasômetro, K

$V_{cp}$  = Volume de gás passado no orifício crítico, corrigido para condições padrão, L

$$K' = \text{coeficiente do orifício crítico, } \frac{(L)(\sqrt{K})}{(mmHg)(\text{min})}$$

$\theta$  = Duração da rodada, min

$T_a$  = Temperatura ambiente, K

$Y$  = Fator do gasômetro (já conhecido)

- Tirar a média dos fatores de calibração  $Y$  do gasômetro para cada um dos orifícios críticos. Obtem-se  $\bar{Y}$ . O fator  $Y$  para cada rodada não deve diferenciar em mais de  $\pm 2\%$  da média  $\bar{Y}$ .
- Finalmente, obter o fator  $Y_g$  do gasômetro tirando-se a média dos fatores  $\bar{Y}$  para cada orifício.
- Para determinar se é necessário recalibrar um determinado orifício crítico, comparar o fator  $Y$  do gasômetro, obtido com este orifício, com os fatores  $Y$  do gasômetro, obtidos com orifícios críticos de dimensões adjacentes à dimensão do

orifício que se está checando, toda vez que o gasômetro for calibrado. Se qualquer orifício gerar um fator Y diferente em mais de 2 % dos outros, recalibrar o orifício crítico conforme a Seção 7.0.

| <b>CALIBRAÇÃO GASÔMETRO CONTRA CALIBRADOR CRÍTICO</b> |  |                         |                         |                  |                         |                  |
|---|--|-------------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|------------------|
| <b>GASÔMETRO</b>                                      |  | <b>MARCA: Tecnobras</b> |                         | <b>Nº 081022</b> |                         |                  |
|   | <b>ORIFÍCIO CRÍTICO</b>                  |                         | <b>ORIFÍCIO CRÍTICO</b> |                  | <b>ORIFÍCIO CRÍTICO</b> |                  |
|   | <b>Ident.:</b>                           | CPP-08                  | <b>Ident.:</b>          | CPP-16           | <b>Ident.:</b>          | CPP-23           |
|   | <b>Vazão:</b>                            | 7,9 L/min               | <b>Vazão:</b>           | 15,87 L/min      | <b>Vazão:</b>           | 22,97 L/min      |
|   | <b>Fator K':</b>                         | 0,4575 L/(K.min)        | <b>Fator K':</b>        | 0,9192 L/(K.min) | <b>Fator K':</b>        | 1,3306 L/(K.min) |
| <b>Rodada ⇒</b>                                       | 1  | 2                       | 1                       | 2                | 1                       | 2                |
| <b>Leitura Gasômetro:</b>                             |  |                         |                         |                  |                         |                  |
| <b>Inicial V<sub>i</sub> (L)</b>                      | 273                                      | 328                     | 457                     | 577              | 152                     | 212              |
| <b>Final V<sub>f</sub> (L)</b>                        | 323                                      | 378                     | 507                     | 627              | 202                     | 262              |
| <b>Dif. V<sub>g</sub> (L)</b>                         | 50                                       | 50                      | 50                      | 50               | 50                      | 50               |
| <b>Temperatura Gasômetro:</b>                         |  |                         |                         |                  |                         |                  |
| <b>Entrada T<sub>e</sub> (K)</b>                      | 301                                      | 301                     | 301                     | 301              | 300                     | 300              |
| <b>Saída T<sub>s</sub> (K)</b>                        | 301                                      | 301                     | 301                     | 301              | 300                     | 300              |
| <b>Média T<sub>g</sub> (K)</b>                        | 301                                      | 301                     | 301                     | 301              | 300                     | 300              |
| <b>Tempo Rodada:</b>                                  |  |                         |                         |                  |                         |                  |
| <b>θ (min)</b>  | 6,257                                    | 6,237                   | 3,243                   | 3,235            | 2,177                   | 2,185            |
| <b>Manômetro:</b>                                     |  |                         |                         |                  |                         |                  |
| <b>ΔH (mm H<sub>2</sub>O)</b>                         | 8,5                                      | 8,5                     | 38                      | 38               | 84                      | 84               |
| <b>Vácuo (cm Hg):</b>                                 | 65                                       | 63                      | 59                      | 57               | 54                      | 52               |
| <b>Pressão atm:</b>                                   |  |                         |                         |                  |                         |                  |
| <b>P<sub>b</sub> (mm Hg)</b>                          | 771,06                                   | 771,06                  | 771,06                  | 771,06           | 771,06                  | 771,06           |
| <b>Temp. amb:</b>                                     |  |                         |                         |                  |                         |                  |
| <b>T<sub>a</sub> (K)</b>                              | 300                                      | 300                     | 300                     | 300              | 300                     | 300              |
| <b>Volume Padrão Gasômetro:</b>                       |  |                         |                         |                  |                         |                  |
| <b>V<sub>gr</sub> (L)</b>                             | 49,8743                                  | 49,8743                 | 50,0145                 | 50,0145          | 50,4005                 | 50,4005          |
| <b>Volume Padrão Orifício:</b>                        |  |                         |                         |                  |                         |                  |
| <b>V<sub>cr</sub> (L)</b>                             | 49,5813                                  | 49,4228                 | 51,6318                 | 51,5045          | 50,1726                 | 50,3570          |
| <b>Fator Y</b>  | 0,994                                    | 0,991                   | 1,032                   | 1,030            | 0,995                   | 0,999            |
| <b>Fator médio <math>\bar{Y}</math></b>               | $\bar{Y}_{08} = 0,993$                   |                         | $\bar{Y}_{16} = 1,031$  |                  | $\bar{Y}_{23} = 0,997$  |                  |
|   | <b>FATOR Y<sub>g</sub> DO GASÔMETRO:</b> |                         |                         | <b>1,007</b>     |                         |                  |

$$V_{gp} = K_1 V_g \frac{P_b + \frac{\Delta H}{13,6}}{T_g} \quad V_{cp} = \frac{K' P_b \theta}{\sqrt{T_a}} \quad \bar{Y} = \frac{V_{cp}}{V_{gp}} \quad Y_g = \frac{\bar{Y}_{08} + \bar{Y}_{16} + \bar{Y}_{23}}{3}$$

**OBS.: O Fator Y<sub>g</sub> do gasômetro deve estar dentro da faixa de 0,9600 e 1,0400.**

|                            |              |
|----------------------------|--------------|
| <b>LOCAL:</b>              | <b>DATA:</b> |
| <b>REALIZADA POR:</b>      |              |
| <b>SUPERVISIONADA POR:</b> |              |

**FIGURA 8.1** Folha de dados para a determinação do fator Y do gasômetro (com exemplo)