

ADAPTAÇÃO DE UM FLUXCENTRO PARA ESTUDOS DE TROCAS GASOSAS E UM MÉTODO DE AFERIÇÃO DE CAPILARES¹

ADONAI GIMENES CALBO²

RESUMO - Adaptou-se um fluxcentro ou dispositivo para misturar gases e controlar-lhes o fluxo. A adaptação descrita permite a mistura de um, dois, três ou quatro gases e o controle do seu fluxo em 12 saídas independentes. Desenvolveu-se um procedimento que dispensa o uso do bolhómetro para aferição dos capilares, antes de cada experimento. De acordo com este procedimento, conectou-se um capilar calibrado de fluxo F_2 , sob um gradiente de pressão P , à saída do capilar sob aferição no fluxcentro. A conexão do capilar calibrado faz com que a leitura do manómetro correspondente seja reduzida de P para $(P - \Delta P)$. O fluxo do capilar sob aferição (F_1), sob o gradiente de pressão P , foi calculado com a equação $F_1 = F_2 \cdot \Delta P / (P - \Delta P)$.

Termos para indexação: controle de fluxo, calibração, capilar.

ADAPTATION OF A FLOWBOARD FOR GAS EXCHANGE STUDIES AND A METHOD FOR CAPILLARY CALIBRATION

ABSTRACT - A flowboard or device to mix and control the flow of gases was adapted. The adaptation described allows a mixture of one, two, three or four gases and their flow control through 12 independent outlets. The use of the flowboard manometer for faster capillary check or calibration is suggested. In accordance with this procedure a calibrated capillary having a flow F_2 , at the pressure gradient P , was connected to the outlet of the capillary under measurement in the flowboard. This connection causes the reading of this particular capillary to be reduced from P to $(P - \Delta P)$. The flow under measurement (F_1), under the pressure gradient P , was calculated with the expression $F_1 = F_2 \cdot \Delta P / (P - \Delta P)$.

Index terms: flux control, manometers, pressure.

INTRODUÇÃO

Atmosfera controlada para finalidades experimentais pode ser obtida pela mistura de fluxos constantes de diferentes gases. Na Fig. 1 (A) obtém-se um fluxo constante de ar, controlando-se a pressão pelo escape de ar numa coluna de água de 60 cm (barostato). Neste caso utiliza-se um manómetro para medir a diferença de pressão (P) através do capilar de controle de fluxo. O controle de pressão também pode ser feito por válvulas de escape construídas com mola. A medida precisa do fluxo é usualmente feita com um bolhómetro (Fig. 1B). Entretanto a aferição rápida dos capilares previamente calibrados, ou uma calibração menos precisa, pode ser feita com o fluxímetro de capilar (Fig. 1C). No fluxímetro de capilar (Sestak et al. 1971, Slavick 1974) o fluxo é proporcional à altura de coluna de água:

$$F_1 = F_2 \cdot \Delta P / P \quad (1)$$

onde F_1 é o fluxo do capilar sob aferição, F_2 é o flu-

xo do capilar de referência; ambos sob aplicação de um gradiente de pressão P . ΔP é a perda de carga no capilar sob medição (Fig. 1). Contudo, o fluxímetro de capilar é uma resistência em série, e por isto o gradiente efetivo de pressão através do capilar sob aferição é reduzido de P para $P - \Delta P$. Desta forma, para calcular o fluxo real a partir da medida de ΔP , a equação 1 precisa ser multiplicada pelo fator de correção $[P/(P - \Delta P)]$, conforme mostra a equação 2:

$$F_1 = F_2 \cdot \Delta P / (P - \Delta P) \quad (2)$$

Baseados no esquema apresentado na Fig. 1A, Claypool & Keefer (1942), descreveram um "flow-board" para estudos de respiração com uso da técnica potenciométrica. O "flowboard", aqui denominado fluxcentro, é uma unidade de controle de fluxo com saídas múltiplas. Este tipo de equipamento é atualmente utilizado em diversos laboratórios, para medidas de respiração, produção endógena de etileno e no preparo de atmosferas com diferentes teores de O_2 , CO_2 , CO ou etileno.

O objetivo deste trabalho é descrever um fluxcentro visando obter, de forma organizada, numerosas saídas com fluxos ou misturas de fluxos de concentrações conhecidas, e propor uma técnica para a aferição rápida de capilares, a qual utiliza o princípio esquematizado na Fig. 1C, para uso durante a montagem de experimentos.

¹ Aceito para publicação em 8 de maio de 1989.

² Eng. - Agr., Ph.D., em Fisiologia Vegetal EMBRAPA/Centro Nacional de Pesquisas de Hortaliças (CNPq). Caixa Postal 070218, CEP 70359 Brasília, DF.

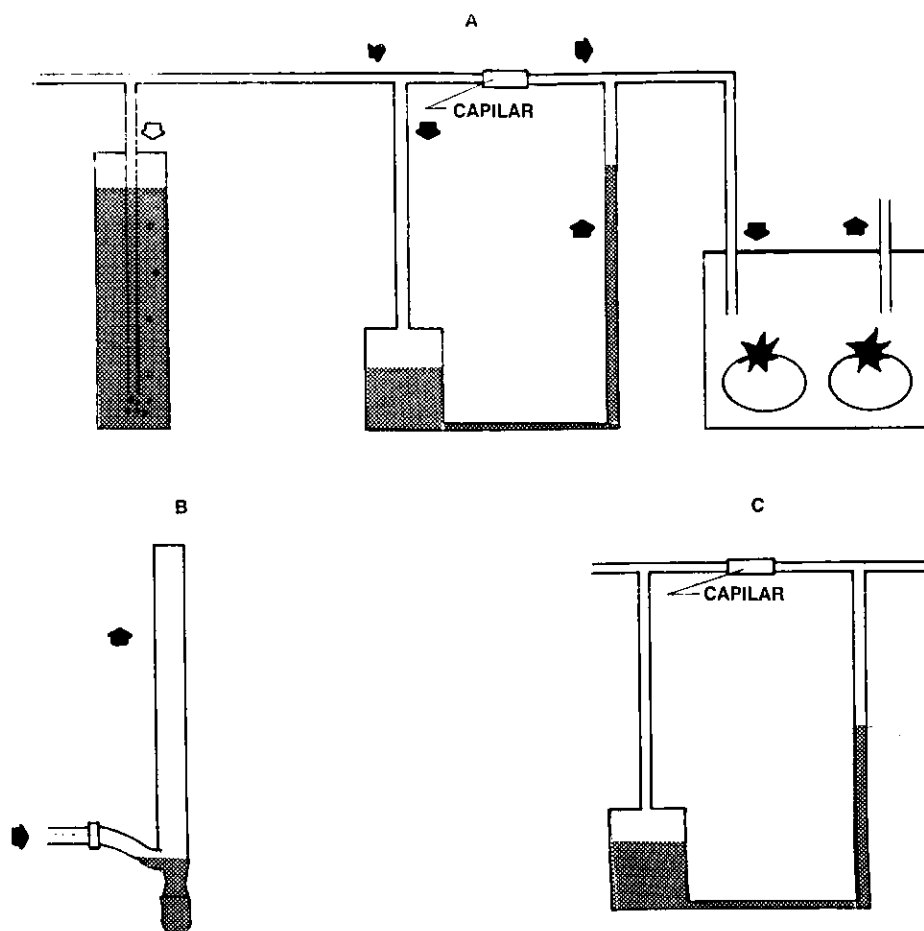


FIG. 1. Esquemas freqüentemente utilizados para controle e medição de fluxo. A - Controle de fluxo com capilar e pressão constante ajustada por escape na coluna de água (Barostato). Este esquema inclui um manômetro para medir a diferença de pressão (P) através do capilar de controle de fluxo. B - Bolhômetro para medição do fluxo de gases. C - Fluxímetro de capilar. No fluxímetro de capilar o fluxo é proporcional a diferença de pressão ΔP .

MATERIAL E MÉTODOS

Foi construído, no Centro Nacional de Pesquisa de Hortaliças (CNPq), da EMBRAPA, um fluxcentro para controlar o fluxo de um gás ou para preparar misturas de fluxos controlados de até quatro gases, em 12 saídas independentes, conforme mostram as Fig. 2 e 3. Vistas frontal e dorsal do fluxcentro são apresentadas na Fig. 2, ao passo que um esquema deste equipamento com seus principais componentes é apresentado na Fig. 3.

A estrutura do fluxcentro foi feita de madeira, os distribuidores 2 e 6 foram feitos de tubos de PVC perfurados de 2 cm de diâmetro por 24 cm de comprimento e o distribuidor 5 foi feito perfurando-se segmentos de acrílico de cerca de $1 \times 3 \times 5 \text{ cm}^3$. Nestes distribuidores, cada perfuração recebeu um segmento de tubo de plástico de 0,5 cm de diâmetro por 2 cm de comprimento, colado com araldite, para funcionar como entrada ou saída. Tubo de látex 201 foi utilizado para conectar os distribuidores e demais itens (Fig. 3). O baróstato (12) e o reservatório de água dos manômetros (8)

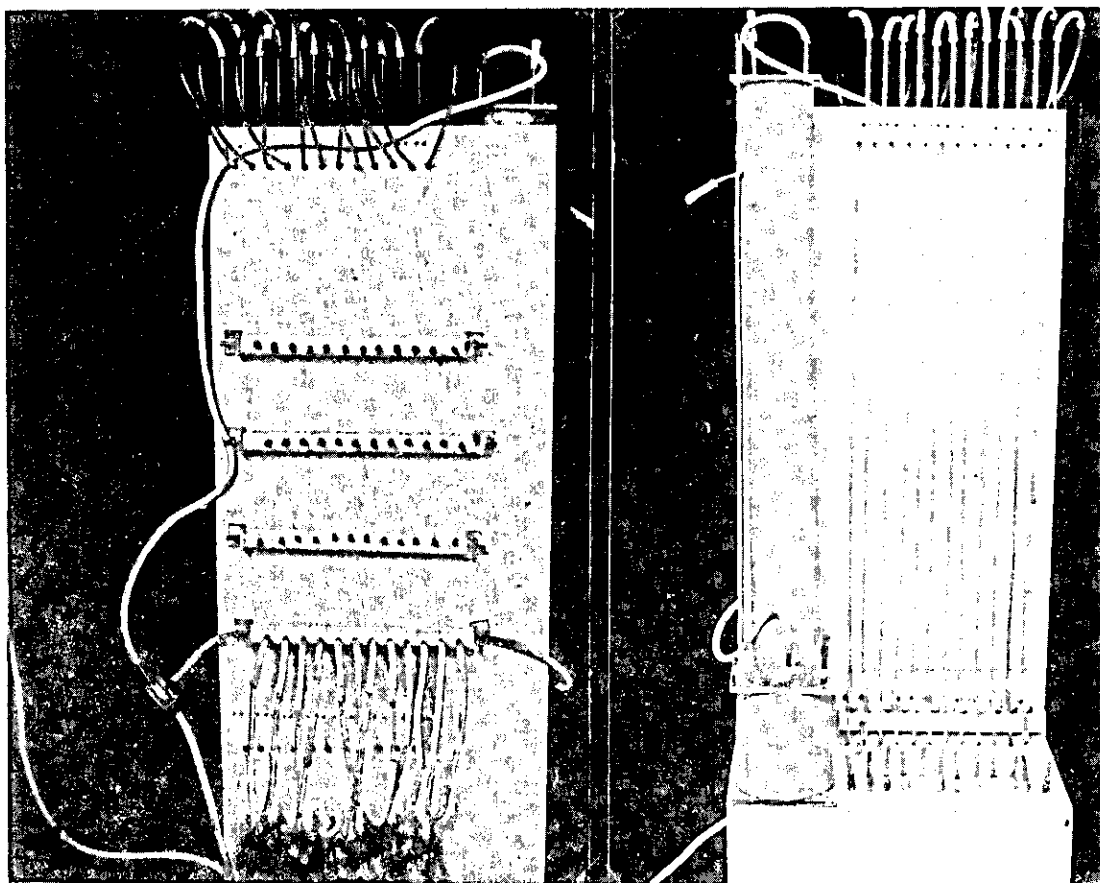


FIG. 2. Vista da frente e do verso de um fluxcentro.

foram construídos com tubos de PVC de 6 cm e 10 cm de diâmetro, respectivamente. O baróstato possui tampa perfurada, pela qual podem passar até quatro tubos de vidro de 0,5 cm de diâmetro, conectados a cada um dos distribuidores de gás (2). Um desses tubos de vidro obrigatoriamente é conectado também ao reservatório de água (8); desta forma, a pressão com que o gás entra no aparato é transmitida a todos os manômetros pelo distribuidor de água (6). Cada um dos 12 manômetros marca a diferença entre a pressão de entrada e a pressão de saída do gás ou mistura gasosa. Na Fig. 3, apresenta-se apenas a conexão de um manômetro, porém todos os manômetros podem ser vistos na Fig. 2. Note-se que a saída do fluxo controlado ocorre pelo distribuidor de mistura de gases (5). Este distribuidor é conectado com a parte superior de um manômetro e a uma saída de cada distribuidor dos gases individuais que estejam sendo utilizados. Assim, no caso mais simples, quando, por exemplo, apenas ar estiver sendo empregado, três das quatro entradas traseiras de gases do distribuidor (5) estarão fechadas pela conexão de tampas feitas de pedaços de tubo de látex 201 de 3 cm, aproximadamente, obstruídos pela inserção de um segmento de bastão de vidro com cerca de 1 cm.

Na parte posterior, os quatro distribuidores de gases individuais (2) possuem doze saídas laterais, que também, eventualmente, podem ser fechadas com tampas de tubo de látex obstruído por um segmento de bastão de vidro. Isto permite o uso de um número menor de fluxos ou misturas de fluxos independentes, sempre que for necessário. O controle do fluxo de cada gás ocorre entre cada uma das saídas dos distribuidores de gases individuais (2) e um distribuidor de mistura (5). Este controle é feito por um capilar calibrado conectado a dois segmentos de tubo de látex 201, conforme se pode verificar na Fig. 2. O gás ou mistura gasosa de cada saída (proveniente do distribuidor de mistura (5)) pode ser conectado com câmaras contendo materiais sob estudo, conforme indica o esquema da Fig. 3.

A aferição rápida dos capilares foi feita utilizando-se os próprios manômetros do fluxcentro como fluxímetros, com o uso da equação 2. Neste caso, P foi o valor do gradiente de pressão de trabalho no baróstato. Isto correspondeu a uma profundidade de ± 60 cm no tubo de escape e a uma leitura manométrica de 60 cm. ΔP foi a redução no gradiente de pressão observada no manômetro correspondente (no fluxcentro), quando o capilar de referência foi ligado em série

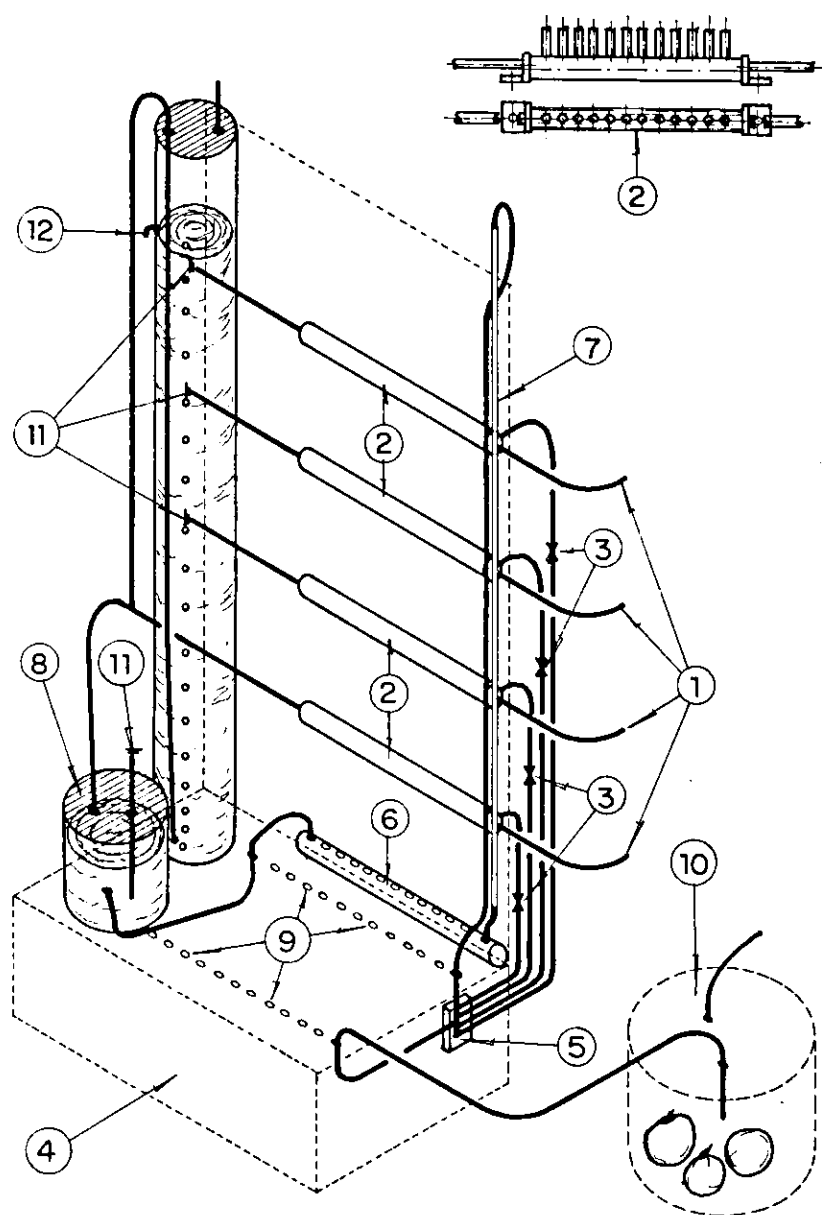


FIG. 3. Esquema de um fluxômetro. 1 - entradas de gás. 2 - distribuidores de gás com 12 saídas. 3 - capilares. 4 - estrutura de madeira. 5 - distribuidor para tomar a pressão de saída e misturar os gases. 6 - distribuidor de água para os manômetros. 7 - tubo de vidro do manômetro. 8 - reservatório de água conectado à entrada de um dos gases serve como referência do nível de água ou pressão para os 12 manômetros. 9 - orifícios para passagem de tubos. 10 - câmara sob fluxo constante. 11 - saídas para conectar a tubos de escape. 12 - barostato para controle da pressão dos gases por escape na coluna de água.

à saída do capilar sob aferição (Fig. 4). A redução ΔP possui módulo igual ao ΔP do fluxímetro de capilar, esquematizado na Fig. 1, quando o capilar de referência é o mesmo. F_1 é o fluxo (corrigido) do capilar sob aferição quando exposto a um gradiente de pressão P , e F_2 é o fluxo do capilar de referência quando submetido ao mesmo gradiente de pressão P .

Tubos capilares de vidro, cobre e plástico de diversas espessuras, disponíveis no mercado, podem ser utilizados para a formação de um catálogo de capilares necessário à operação do fluxcentro. O processo de seleção de capilares é usualmente empírico; cortam-se pedaços de tubo capilar e mede-se o fluxo, com um bolômetro ou fluxímetro de capilar. Se o fluxo obtido for baixo, cortam-se pedaços mais curtos do mesmo diâmetro ou comprimento semelhante de um tubo

capilar com maior diâmetro. O procedimento inverso é usado caso o fluxo seja muito alto. Convém, contudo, empregar a equação de Poiseuille (Moore 1972) antes de fazer a escolha dos diâmetros de capilares para a compra.

$$F = \pi \cdot (P_1 - P_2) \cdot r^4 / 8 \cdot l \cdot \eta \quad (3)$$

Nesta equação, F é o fluxo, r é o raio do capilar, l é o comprimento, η é a viscosidade do gás, P_1 é a pressão de entrada no capilar, P_2 é a pressão de saída e π é um número com valor aproximado de 3,14159. A equação 3 foi desenvolvida para líquidos e só é aplicável para fluidos compressíveis quando $P_1 \approx P_2$. Note-se que para o gradiente de pressão de trabalho num fluxcentro ($P_1 - P_2$) é usualmente, 60 cm de

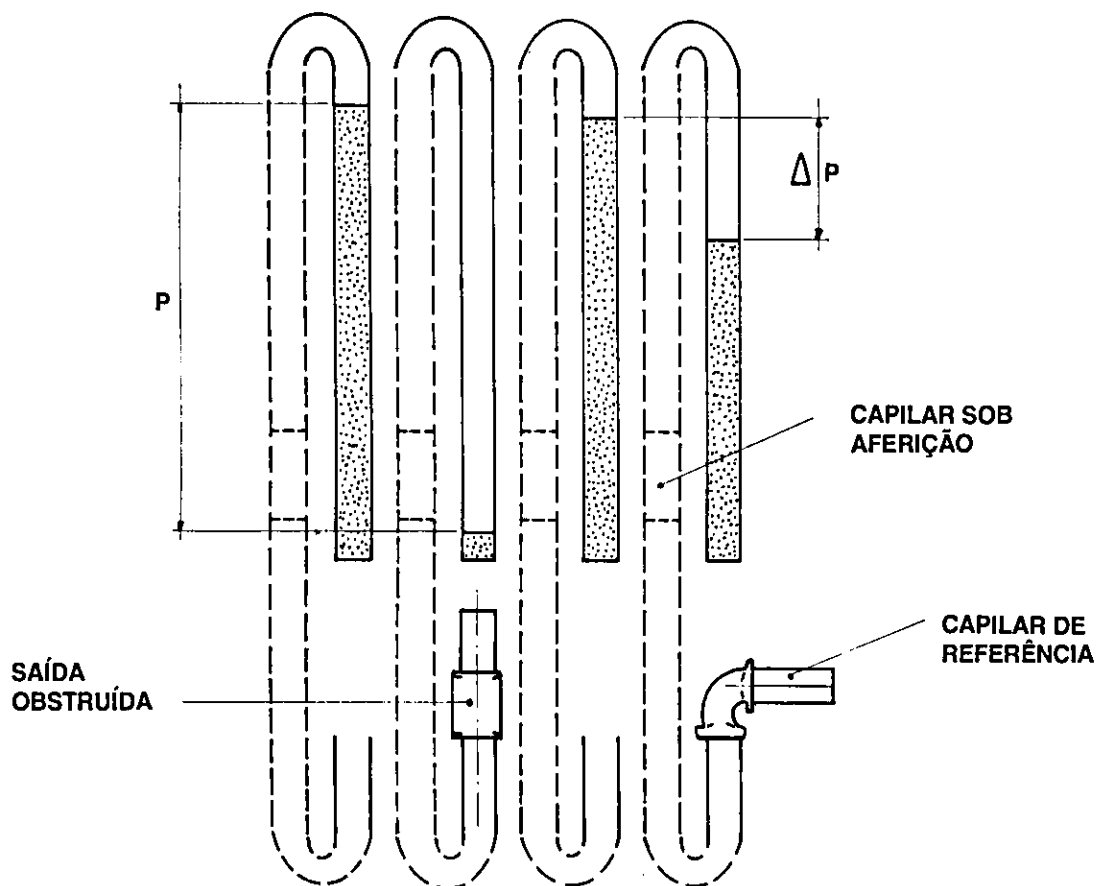


FIG. 4. Esquema de uma vista frontal de 4 dos 12 manômetros de um fluxcentro, que está sendo utilizado para a aferição rápida de capilares. P é o gradiente de pressão de trabalho e ΔP é a redução no gradiente de pressão de trabalho no capilar sob aferição (que fica atrás do fluxcentro conforme pode ser visto na Fig. 2), causado pela conexão do capilar de referência. Note que P pode ser diretamente medido obstruindo-se uma das saídas do fluxcentro.

coluna de água e sob uma pressão de 1 atm, P_2 seria equivalente a uma coluna de 1033 cm. Caso P_1 seja bastante diferente de P_2 , deve-se aplicar a fórmula Poiseuille com correção para a compressibilidade dos gases (Moore 1972). O termo η ou viscosidade na equação 3 é proporcional à raiz quadrada da temperatura, sendo independente da pressão, no caso de gases ideais. O valor da viscosidade em $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot 10^{-6}$, à temperatura de 0°C , na pressão de 1 atm, para os gases biologicamente mais importantes são: ar - 21.0, CO_2 - 13.8, O_2 - 18.09, N_2 - 16.7, C_2H_4 - 9.33 (Moore 1972). Estes valores de viscosidade podem ser utilizados para calcular o fluxo gasoso de diferentes moléculas num mesmo capilar.

A equação 3 não dispensa a calibração, porque pequenos desvios no diâmetro nominal dos capilares causam grandes erros na estimativa do fluxo. Capilares de vidro de precisão são caros, e, se capital for um fator limitante, podem ser utilizados capilares de cobre ou de plástico. Alternativamente, podem ser substituídos os capilares de vidro de precisão por hematocapilares, de baixo custo, utilizando-se o seguinte procedimento: sob uma pequena chama, esticar um grande número de hematocapilares até diferentes comprimentos; seções finas dos capilares assim esticados são então colocadas com epóxi dentro de pedaços de tubo de vidro (0,5 cm de diâmetro e 10 cm de comprimento) que permitem conexões fáceis com tubo de látex. Desta forma foram obtidos capilares com fluxo variando entre 0.1 ml/min e 3000 ml/min. Desde que o nível de água no baróstato seja mantido constante, estes capilares são bastante reproduzíveis no tempo. É importante mencionar que o fluxo de ar em capilares assim preparados é, freqüentemente, turbulento. Capilares que apresentam fluxo turbulento não podem ser utilizados como referência, pois o gráfico que relaciona ΔP e o fluxo medido com bolhômetro não é linear, ao contrário do que ocorre quando o fluxo é laminar (equação 3).

O bolhômetro é o método mais popular e exato para a calibração e aferição de capilares, porém consome muito tempo; os rotâmetros são muito convenientes apesar de pouco precisos; uma terceira alternativa são os fluxímetros de capilar, que são menos exatos que os bolhômetros porém são de fácil construção e oferecem melhor precisão do que os rotâmetros. Num fluxímetro de capilar, o erro na calibração do capilar de referência causa erro proporcional na medida dos capilares sob aferição. Este fluxímetro também requer que o fluxo através do capilar de referência seja laminar e siga a equação 3. Para verificar se o fluxo através de um capilar é laminar, basta aplicar a equação 3 e verificar se o fluxo, medido com bolhômetro, é proporcional à pressão aplicada ao capilar que se pretende utilizar como referência. Nesta calibração, a pressão de entrada de ar num capilar pode ser controlada variando a profundidade do tubo de escape no baróstato (Fig. 1). Capilares preparados conforme se descreve no parágrafo anterior usualmente são sujeitos a turbulência e não devem ser utilizados como referência.

Os manômetros do fluxcentro servem para indicar o gradiente de pressão entre o gás que entra nos capilares de controle de fluxo e a pressão na saída, através do distribuidor de mistura (5). Estes manômetros ajudam na diagnose de alguns problemas experimentais. Por exemplo: o dobramento acidental de um tubo, que restringe a passagem do gás para a câmara com o produto sob estudo, imediatamente reduz a pressão no manômetro correspondente.

Neste trabalho sugere-se que os manômetros também se-

jam utilizados para a aferição rápida de capilares com a aplicação da equação 2 e o uso de um capilar de referência. Este procedimento é recomendável para evitar que capilares cujo fluxo anotado no rótulo já estejam alterados significativamente e não sejam utilizados na montagem de experimentos. De acordo com a equação 2, calcula-se o fluxo dos capilares utilizados no fluxcentro fazendo-se a medição da redução de pressão ΔP no manômetro, ao qual se conecta um capilar de referência, com auxílio de um pequeno pedaço de tubo de látex 201 (Fig. 4). Apesar do alto R^2 na regressão linear entre o fluxo calculado e o fluxo medido com o bolhômetro, para os mesmos capilares, a Fig. 5 mostra um coeficiente angular diferente de 1, ilustrando que um erro na medida de fluxo do capilar de referência causa um erro sistemático nas medidas de fluxo, feitas com esta técnica. Este erro sistemático não é importante quando se quer apenas descartar capilares apresentando grandes desvios no fluxo anotado no rótulo, durante o preparo do catálogo de capilares, usando o bolhômetro. Entupimentos ou quebras e a entrada de água são causas comuns de alteração no fluxo de capilares.

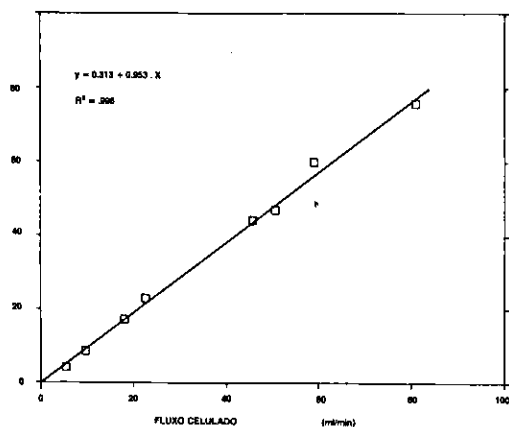


FIG. 5. Regressão linear relacionando fluxo de ar calculado com a equação 2 e fluxo medido com o bolhômetro. O fluxo de ar do capilar de referência foi 403 ml/min a $23 \pm 0.5^\circ\text{C}$, sob um gradiente de pressão de 60 cm de coluna de água no baróstato.

CONCLUSÕES

Com a utilização do fluxcentro obteve-se o controle de fluxo de um gás ou de misturas de fluxos controlados de dois, três ou quatro gases.

O coeficiente de variação do fluxo, para medidas repetidas de fluxo num mesmo capilar, independentemente de seu fluxo, foi da ordem de 2% a

23°C $\pm$ 3°C. A confiabilidade deste tipo de equipamento é a razão pela qual ele tem sido freqüentemente utilizado na condução de medidas de respiração, evolução de etileno, e no armazenamento experimental de produtos perecíveis em atmosfera controlada.

REFERÊNCIAS

- CLAYPOOL, L.L. & KEEFER, R.M. A colorimetric method for CO₂ determination. **Proc. Am. Soc. Hort. Sci.**, 40:177-86, 1942.
- MOORE, W.J. **Physical chemistry**. London, Freeman and Co, 1972. 977p.
- SESTAK, Z.; CATSKY, J.; JARVIS, P.G. ed. **Plant photosynthetic production; manual of methods**. The Hague, W. Junk N.V., 1971. 818p. Ilust.
- SLAVICK, S. **Methods of studying plant water relations**. Berlin, Springer-Verlag, 1974. 449p. (Ecological Study, 9)