

# A Calibração de um Sensor de Fluxo de Orifício Variável Depende do Circuito em que se Encontra?

Vinícius Trajando  
Programa de Engenharia Biomédica,  
COPPE, Universidade Federal do Rio de  
Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil

Gabriel Motta-Ribeiro  
Programa de Engenharia  
Biomédica, COPPE, Universidade  
Federal do Rio de Janeiro, Rio de  
Janeiro, Brazil

Frederico C. Jandre  
Programa de Engenharia Biomédica,  
COPPE, Universidade Federal do Rio de  
Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil  
ORCID: 0000-0002-7246-714X

**Abstract**—This work evaluated the repeatability and reproducibility of the calibration of a variable orifice flow sensor using the method of fixed volume syringe, focusing only on the direction of stroke. We compared both sides of the flow sensor (W and B) in setups with or without an extension tube. For each of the 4 possible combinations 3-L bidirectional injections with sinusoidal profile (121 cycles, 11 at 11 different peak flow levels) were generated with an automated syringe. Three repetitions were recorded for each setup and one was used to generate 5 degree polynomials for each side of the sensor. Considering acceptable a maximum error of 3%, the calibration for the emptying syringe showed repeatability for all settings, while for the filling syringe repeatability was found only for side B without the extension tube. None of the calibrations showed reproducibility when a calibration performed with an emptying syringe was applied to measurement from the filling syringe, or the other way around. The errors were largest with the extension tube at low peak flows. These results support that the calibration should use the direction of the syringe that resembles the flow during application, although further studies must be performed to evaluate effects of other extension tubes and other gas compositions.

**Keywords** — *biomedical instrumentation, respiratory physiology, flow sensor, calibration*

## I. INTRODUÇÃO

A medição correta do fluxo, e em especial a sua integral (volume), dos gases que entram e saem do sistema respiratório durante a inspiração e expiração é utilizada em diferentes aplicações médicas, tais como: ventilação mecânica [1], espirometria [2], anestesia [3] e medição de parâmetros metabólicos [4]. Estas aplicações possuem diferentes requisitos quanto ao sentido do fluxo, a localização do sensor, e o tipo de pressão motriz para o fluxo (pressurização ou sucção). Portanto, pode-se supor que haja diferentes requisitos para a calibração em cada aplicação de modo a permitir medições repetitivas e reproduzíveis.

Existem diversas classes de sensores de fluxo com diferentes princípios de medição, sendo o sensor de fluxo por pressão diferencial um dos amplamente usados [5]. Essa classe de sensores tem como princípio de funcionamento o posicionamento de um elemento resistivo na forma de restrição ao fluxo, por onde escoar o fluido: a diferença entre as pressões antes e depois do elemento resistivo é medida por um transdutor de pressão diferencial convertendo pressão em tensão elétrica que, por fim, é calibrada em fluxo. Fazem parte

dessa classe os medidores lineares com tubos capilares (Fleisch) ou tela (Lilly), medidores de efeito Venturi, medidores de orifício fixo e medidores de orifício variável (MOV). Esse último vem atraindo crescente interesse entre fabricantes de equipamentos e a comunidade científica por ser bidirecional, menos suscetível a erros causados pela condensação do ar expirado, e poder ser construído com dimensões menores que medidores Fleisch e Lily, enquanto preservam maior linearidade da curva de calibração com maior faixa de medição se comparados aos sensores de orifício fixo [1].

A medição de fluxo é influenciada por diferentes características do fluido e do padrão de fluxo, sendo a magnitude desta influência dependente da classe de sensor utilizada. Para a medição por pressão diferencial, a relação entre fluxo e pressão depende não somente da geometria do elemento resistivo, mas também da viscosidade do fluido, a qual varia com a composição e temperatura do mesmo. Para um mesmo fluido e temperatura, a relação fluxo-pressão também depende do regime (laminar ou turbulento) do fluxo, das geometrias do sensor e a montante [6], e do tipo de pressão motriz, o qual altera as perdas de carga e variações de temperatura locais. Adicionalmente, diferenças na microestrutura do elemento deformável de um MOV podem resultar em diferentes relações fluxo-pressão para cada sentido do fluxo [1]. Os fatores apresentados anteriormente podem alterar a repetibilidade e reprodutibilidade da calibração dos sensores.

Diferentes estratégias são utilizadas para reduzir os possíveis erros gerados por mudanças nas condições dos gases, e características do fluxo e dos sensores. Uma destas estratégias é a realização de verificações diárias e recalibração utilizada em equipamentos de espirometria. Para simplificar esse processo diário, e considerando que o objetivo principal é medir os volumes pulmonares, utiliza-se um método de calibração por seringa de precisão. Este método elimina a necessidade de equipamentos para gerar fluxos precisos, ao minimizar o erro do volume estimado, mas exige do operador da seringa o trabalho repetitivo de movimentar o êmbolo dezenas de vezes.

O tempo necessário para realizar esta calibração pode ser reduzido se os dois sentidos do sensor de fluxo puderem ser calibrados simultaneamente, aproveitando-se o fluxo durante o enchimento e esvaziamento da seringa. Entretanto, este procedimento bidirecional pode reduzir a repetibilidade da calibração se o efeito do tipo de pressão motriz for maior que o erro de calibração aceitável. O objetivo deste trabalho foi avaliar a repetibilidade e reprodutibilidade desta calibração simultânea para um MOV. Para esta avaliação comparou-se calibrações e medições para os dois sentidos de movimento do êmbolo da seringa. Adicionalmente, avaliou-se o efeito de um tubo na saída do sensor de fluxo com a hipótese de que este tubo permitiria o desenvolvimento do fluxo antes do ponto de medição e melhoraria a repetibilidade e reprodutibilidade.

## II. MATERIAIS E MÉTODOS

Para padronizar o fluxo de entrada no sensor de fluxo, utilizou-se uma seringa acionada por um motor CC com posição controlada em malha fechada (H&H PWG, MH Custom Design & Mfg. L.C, Midvale, Utah, EUA). Uma extremidade do MOV foi conectada a seringa, enquanto a outra extremidade foi aberta ao ambiente ou conectada a um tubo de PVC (diâmetro interno = 17,6 cm e comprimento 36 cm). Nas duas configurações, cada lado do MOV (W ou B) foi conectado à seringa, totalizando quatro montagens identificadas pelos numerais de 1 a 4 (Fig. 1).

Em todas as quatro montagens foram aplicadas formas de onda senoidais de 3 L, com amplitudes de 1 a 16 L/min em passos de 1,5 L/min e para cada amplitude, 11 períodos sinusoidais completos foram registrados. Três conjuntos das 121 injeções foram realizados para cada montagem para avaliar a repetibilidade na calibração. Cada repetição é identificada pelos caracteres I, J e K.

A queda de pressão foi medida usando um transdutor  $\pm 500$  Pa (PasCal PC 500 SDET, Hoffrichter GmbH, Alemanha). O sinal do transdutor foi digitalizado por um conversor analógico-digital (NI-6009, NI, EUA) com frequência de amostragem de 1000 Hz e gravado usando sistema de aquisição de dados baseado em LabView (NI, EUA). Os tubos do sensor de fluxo foram sempre conectados

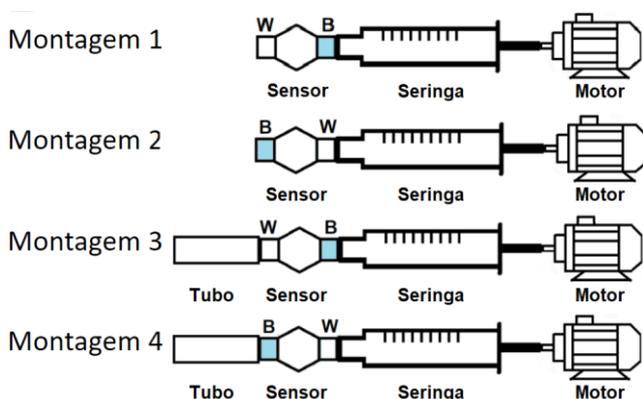


Fig. 1. Configuração esquemática experimental de calibração mostrando as quatro montagens utilizadas

ao sensor de pressão de forma que o movimento de empurrar o êmbolo esvaziando a seringa resultasse em tensões elétricas positivas, denominadas de fluxos positivos. Inversamente, puxar o êmbolo enchendo a seringa correspondeu a fluxos negativos.

## A. Análise dos Resultados

Em cada uma das quatro montagens, uma das repetições foi escolhida como referência (e identificada como I) e os sinais correspondentes foram usados para calibrar a curva característica de tensão elétrica para fluxo do sensor ajustando polinômios de 5º grau à integral do sinal ciclo-a-ciclo usando um critério de mínimos quadrados [7]. Polinômios independentes foram gerados para cada sentido do fluxo. Para avaliar a calibração do sensor utilizou-se o erro volumétrico relativo, definido como a diferença entre o volume estimado e o de referência expressa como uma porcentagem da referência. Uma calibração foi considerada válida quando o erro estava dentro de uma faixa de  $\pm 3\%$ . Calibrações válidas foram comparadas qualitativamente, tendo como critério de qualidade a redução da diferença entre as duas direções de fluxo e menor variabilidade no erro.

A avaliação do efeito da montagem sobre a calibração e medição de fluxo foi realizada para cada um dos lados do sensor, e para montagens com e sem tubo, de forma separada. A repetibilidade da calibração foi avaliada aplicando-se os polinômios de calibração positivo e negativo da repetição I aos respectivos sinais de J e K. A reprodutibilidade da calibração foi avaliada aplicando-se de forma cruzada os polinômios positivo e negativo de uma montagem aos fluxos negativo e positivo (invertendo os sinais) de outra montagem, de forma que um polinômio calculado para o lado W (ou B) é sempre aplicado a um sinal do lado W (ou B).

## III. RESULTADOS

A Fig. 2 mostra os resultados dos erros volumétricos para medidas quando o ar entra pelo lado B. Para a seringa empurrando o ar na montagem 1, utilizou-se como referência os ciclos do sinal 1.I (box tracejado, preto). Os erros para os sinais 1.J e 1.K apresentaram menor mediana e maior intervalo interquartil comparados a 1.I, porém os erros

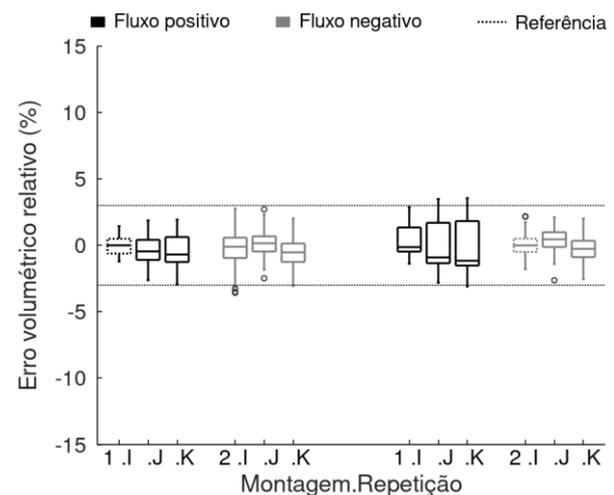


Fig. 2. Repetibilidade e reprodutibilidade para a calibração quando o ar entra pelo lado B do MOV. Os sinais da repetição I para as montagens 1 (seringa empurrando) e 2 (seringa puxando) foram utilizadas para gerar as calibrações testadas. A repetibilidade foi aceitável, pois os erros relativos obtidos para as repetições J e K permaneceram dentro da faixa de 3%. Já no teste de reprodutibilidade, quando os polinômios foram aplicados a outra montagem, os erros saíram da faixa de aceitação em, pelo menos, uma repetição.

permaneceram dentro dos limites de 3%, indicando que a calibração tem repetibilidade aceitável. Já no teste de reprodutibilidade, em que a calibração foi aplicada aos sinais da montagem 2, ocorreram erros maiores que -3%, com um comportamento variável da mediana. Para a calibração com a seringa puxando o ar na montagem 2, os ciclos de 2.I (box

tracejado, cinza) foram utilizados como referência. Os erros para os sinais 2.J e 2.K permaneceram menores que os limites de 3%, enquanto na montagem 1 ocorreram tanto erros maiores que +3% quanto maiores que -3%. Assim, novamente, observou-se repetibilidade aceitável, mas não reprodutibilidade. Ressalta-se, que as medianas com o maior desvio em relação a zero e as os maiores intervalos interquartil ocorreram quando o polinômio de 2.I foi aplicado aos sinais 1.J e 1.K, sugerindo que a reprodutibilidade com a seringa puxando é inferior àquela obtida ao se calibrar com a seringa empurrando o ar.

A Fig. 3 mostra os resultados dos erros volumétricos quando o ar está entrando pelo lado W. Para a seringa empurrando o ar, o polinômio gerado a partir do sinal 2.I (box tracejado, preto) foi utilizado para os testes. O sinal 2.J apresentou uma redução do primeiro e aumento do terceiro quartil em relação a 2.I, enquanto o sinal 2.K apresentou também uma mediana mais negativa. Nos dois casos, porém, o erro permaneceu dentro de limites de 3%, mostrando que a calibração foi repetitiva. Os erros para a montagem 1 apresentaram um maior intervalo interquartil comparados a 2.I, ocorrendo valores maiores que +3% e também -3%, indicando que a reprodutibilidade é pequena. Com a seringa puxando o ar, utilizou-se como referência o polinômio gerado a partir do sinal 1.I (box tracejado, cinza). Os sinais 1.J e 1.K apresentaram aumento do erro mediano, que tornou-se negativo, com a presença de ciclos com erros maiores que -3%. Portanto essa calibração não apresentou repetibilidade aceitável. Aplicar o polinômio de referência nos sinais da montagem 2 também resultou em erros medianos negativos além de um aumento dos intervalos interquartis, sugerindo uma reprodutibilidade baixa ainda que aceitável dentro da faixa de 3% de erro. Os resultados das Figs. 2 e 3 sugerem que o comportamento mecânica dos lados B e W são diferentes.

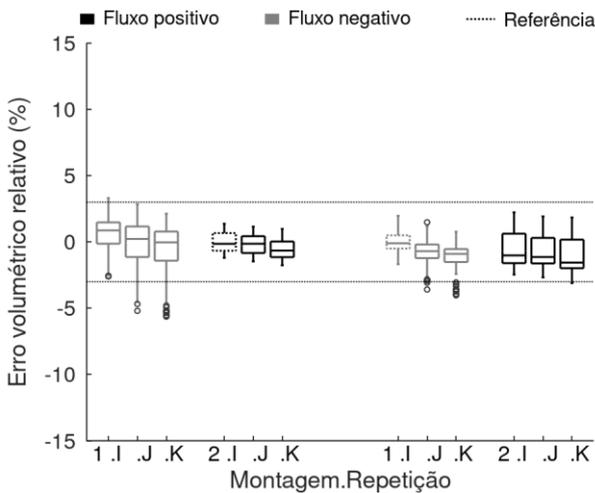


Fig. 3. Repetibilidade e reprodutibilidade para a calibração quando o ar entra pelo lado W do MOV. Os sinais da repetição A para as montagens 1 (seringa puxando) e 2 (seringa empurrando) foram utilizadas para gerar as calibrações testadas. A repetibilidade foi aceitável somente na montagem 2, pois os erros relativos obtidos para as repetições B e C permaneceram dentro da faixa de 3%. Já no teste de reprodutibilidade, quando os polinômios foram aplicados a outra montagem, os erros saíram da faixa de aceitação em pelo menos uma repetição.

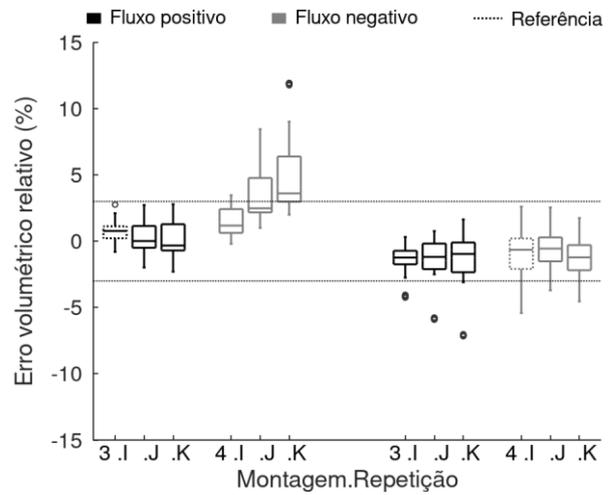


Fig. 4. Repetibilidade e reprodutibilidade para a calibração quando o ar entra pelo lado B do MOV e um tubo é conectado ao lado do sensor oposto a seringa. Os sinais da repetição A para as montagens 3 (seringa empurrando) e 4 (seringa puxando) foram utilizadas para gerar as calibrações testadas. A repetibilidade foi aceitável somente na montagem 3, pois os erros relativos obtidos para as repetições B e C permaneceram dentro da faixa de 3%. Já no teste de reprodutibilidade, quando os polinômios foram aplicados a outra montagem, os erros saíram da faixa de aceitação em todas as repetições.

A Fig. 4 mostra os resultados dos erros volumétricos resultantes dos polinômios calibrados quando o ar entra pelo lado B quando o tubo foi colocado no lado oposto a seringa (montagens 3 e 4). Para a seringa empurrando o ar, utilizou-se como referência o polinômio gerado com para o sinal 3.I (box tracejado, preto). Os erros resultantes da aplicação deste polinômio nos sinais 3.J e 3.K apresentam menor mediana e maior intervalo interquartil comparados a 3.I, porém esses erros permaneceram dentro dos limites de 3%. Já o uso do polinômio de referência nos sinais da montagem 4 resultou em erros maiores que +3%, com medianas apresentando o maior desvio em relação ao zero. Portanto, assim como no caso sem o tubo, a calibração mostrou repetibilidade, mas não reprodutibilidade. Para sinais com a seringa puxando o ar, o polinômio gerado a partir de 4.I (box tracejado, cinza)

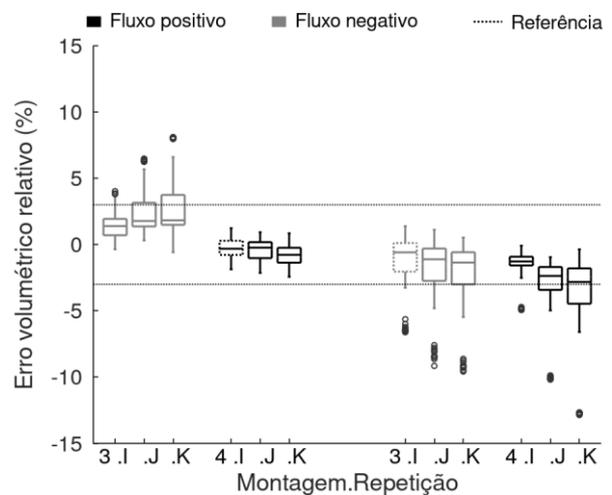


Fig. 5. Repetibilidade e reprodutibilidade para a calibração quando o ar entra pelo lado W do MOV e um tubo é conectado ao lado do sensor oposto a seringa. Os sinais da repetição A para as montagens 3 (seringa empurrando) e 4 (seringa puxando) foram utilizadas para gerar as calibrações testadas. A repetibilidade foi aceitável somente na montagem 4, pois os erros relativos obtidos para as repetições B e C permaneceram dentro da faixa de 3%. Já no teste de reprodutibilidade, quando os polinômios foram aplicados a outra montagem, os erros saíram da faixa de aceitação em todas as repetições.

foi utilizado como referência. Neste caso, todos os sinais, incluindo o 4.I apresentaram erros acima de 3%. Este resultado

indica que não foi possível obter uma calibração aceitável com a seringa enchendo e o tubo conectado ao sensor.

A Fig. 5 mostra os erros volumétricos quando o ar está entrando pelo lado W com um tubo colocado na extremidade oposta. Os resultados dos testes de repetibilidade e reprodutibilidade foram similares aos do lado B com o tubo, destacando-se o aumento da magnitude dos erros volumétricos quando utilizado o polinômio resultante da calibração realizada com o êmbolo da seringa sendo puxado em 3.I.

As distribuições dos erros volumétricos relativos nas diferentes amplitudes de senoide utilizadas durante os

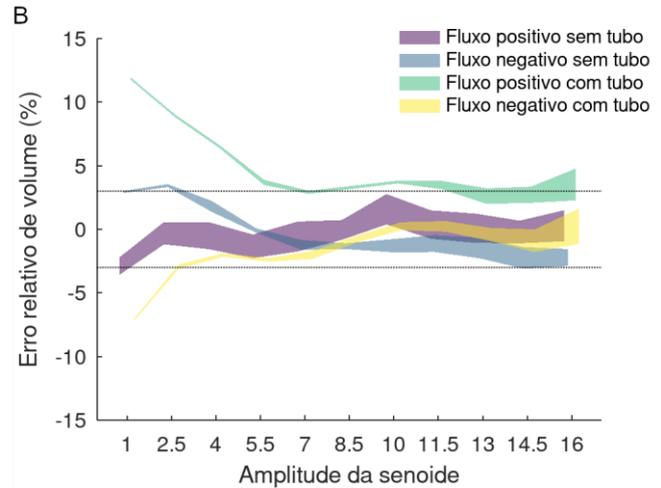
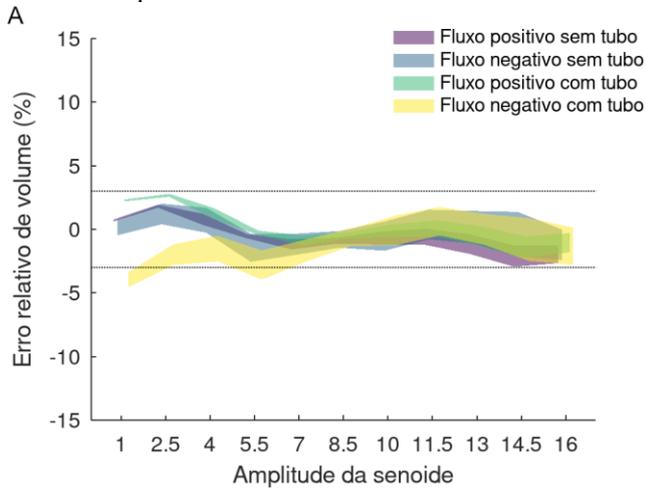


Fig. 6. Distribuição dos erros volumétricos relativos nas diferentes amplitudes de senoide utilizadas durante os experimentos para a calibração quando o ar entra pelo lado B de um MOV: (A) ensaio de repetibilidade em que os polinômios calibrados para a repetição A são aplicados ao sinal das demais repetições da mesma montagem; (B) ensaio de reprodutibilidade em que a calibração em uma montagem é aplicado aos sinais de outra montagem. Estão apresentados os erros das repetições com maiores erros máximos.

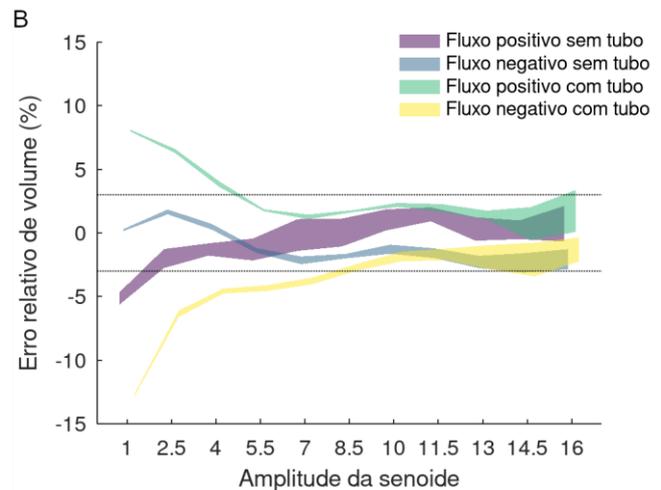
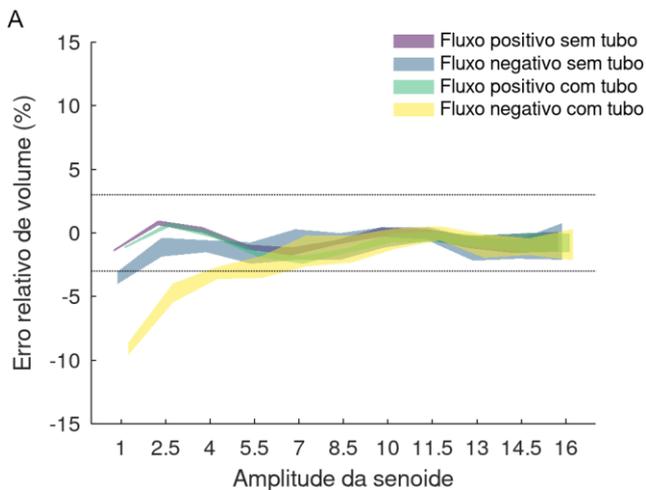


Fig. 7. Distribuição dos erros volumétricos relativos nas diferentes amplitudes de senoide utilizadas durante os experimentos para a calibração quando o ar entra pelo lado W de um MOV: (A) ensaio de repetibilidade em que os polinômios calibrados para a repetição A são aplicados ao sinal das demais repetições da mesma montagem; (B) ensaio de reprodutibilidade em que a calibração em uma montagem é aplicado aos sinais de outra montagem. Estão apresentados os erros das repetições com maiores erros máximos.

#### IV. DISCUSSÃO

Esse estudo teve o objetivo de avaliar experimentalmente a repetibilidade e reprodutibilidade, ao variar-se o sentido do fluxo, de uma calibração de um MOV pelo método de seringa de volume fixo, analisando-se: i) a influência sobre os erros volumétricos dos sentidos do fluxo (empurrando ou puxando o êmbolo) utilizados na calibração e na aplicação; ii) a influência sobre os erros volumétricos da conexão de um tubo no MOV no lado oposto à seringa, durante a calibração. Nossos resultados permitem interpretar que o método de calibração com uma seringa de volume conhecido resulta em medições que apresentam repetibilidade, mas não

reprodutibilidade, principalmente na presença de um tubo na extremidade oposta à seringa.

reprodutibilidade, principalmente na presença de um tubo na extremidade oposta à seringa. Nossos resultados também permitem interpretar que é possível obter calibrações repetitivas com polinômios de 5º grau que cumprem o critério de limite de 3% de erros volumétricos estabelecido pela European Respiratory Society [2] quando se usa calibrações empurrando o êmbolo com o sensor aberto para o ambiente. Para a calibração puxando o êmbolo, não houve repetibilidade para admissão de ar pelo lado W, indicando uma diferença entre os lados do MOV ou menor previsibilidade sobre a repetibilidade nesta condição de calibração. A reprodutibilidade quanto ao sentido do fluxo foi baixa, observando-se aumento da dispersão dos erros e valores

maiores que 3% em pelo menos uma das repetições quando o polinômio ajustado para um sentido de fluxo foi aplicado à medição no sentido oposto, tanto para o lado W quanto o B. Apesar do sensor de fluxo ter uma geometria simétrica, as dimensões geométricas das montagens em cada lado do sensor são diferentes, o que faz com que o tipo de escoamento do ar e a perda de carga sejam diferentes dependendo do sentido do fluxo [6], sendo esta uma possível explicação para a falta de reprodutibilidade. Face a tais resultados de repetibilidade e reprodutibilidade indica-se que o procedimento de calibração siga a condição de sentidos de fluxo presentes na aplicação. No contexto de aplicações relacionadas ao sistema respiratório, na espirometria o ar é puxado através do sensor durante a inspiração e é empurrado durante a expiração. Já durante a ventilação mecânica o ar é normalmente empurrado, seja pelo ventilador ou pelo paciente, ao passar pelo sensor de fluxo. Portanto, para espirometria seria mais adequado utilizar todo o ciclo da seringa, enquanto para uso em ventilação mecânica seria necessário realizar a calibração somente empurrando o êmbolo para cada lado de um MOV.

Para as montagens 3 e 4, as calibrações geradas com o êmbolo sendo empurrado também não apresentaram reprodutibilidade, com o erro fora da faixa aceitável em todas as repetições em que o êmbolo foi puxado. Esses erros durante o teste de reprodutibilidade foram superiores aos observados no caso em que não havia um tubo no lado oposto à seringa (montagens 1 e 2). Adicionalmente, nas montagens com o tubo não foi possível obter uma calibração aceitável com o êmbolo sendo puxado, para nenhum dos dois lados do MOV. Estes resultados não correspondem à hipótese inicial, uma vez que o objetivo da introdução do tubo na extremidade oposta a seringa era permitir o desenvolvimento do escoamento resultando em um fluxo mais laminar no sensor, principalmente para a condição do êmbolo sendo puxado. Segundo essa hipótese, em consequência da esperada laminarização do fluxo, as calibrações seriam mais repetitivas e reprodutíveis.

Avaliando-se o erro relativo para cada amplitude de senóide utilizada, destaca-se que os ciclos com os picos de fluxo mais baixos apresentaram menor variabilidade. Essa diferença entre as amplitudes das senóides pode ser entendida pela regularidade do movimento realizado pela seringa eletrônica associada às diferenças de laminaridade do fluxo para os diferentes picos. Os ciclos com menores picos representam pequena variação na excitação do sensor. Por outro lado, esses ciclos com menores picos apresentam os maiores erros médios. Juntando-se esta observação ao pressuposto de que o tubo de extensão do sensor reduz a turbulência do fluxo, nossos resultados sugerem que o modelo de MOV utilizado funciona melhor com um fluxo menos laminar.

Este trabalho possui limitações em relação ao número de sensores testados e montagem experimental. Os resultados foram obtidos com uma única amostra de sensor e não se pode excluir que sejam particulares a esta amostra. Portanto, estes resultados podem ser entendidos como uma apresentação de métodos e indicação para um estudo detalhado. Foi utilizado o ar ambiente para ambos sentidos do fluxo, mas a temperatura

e composição do ar são diferentes na inspiração e expiração. Entretanto, o uso de condições diferentes para os gases de sentidos diferentes introduziria incertezas que não permitiria a avaliação de reprodutibilidade sugerida; adicionalmente, o procedimento usual de calibração utiliza somente ar ambiente. Utilizou-se somente um comprimento de tubo entre o MOV e o transdutor de pressão diferencial, o qual afeta a sensibilidade e tempo de resposta da medição do fluxo: quanto maior o comprimento, menor a sensibilidade [8]. O comprimento utilizado no experimento foi o original de fábrica, representando o uso mais comum do sensor. O sensor utilizado no experimento já havia sido utilizado antes, o que pode afetar as propriedades mecânicas do elemento flexível uma vez que a resposta do MOV depende da relação de tensão-deformação [1]. O tubo utilizado nas montagens 3 e 4 foi escolhido por ter diâmetro interno compatível com o externo do sensor e um comprimento maior que o quádruplo desse diâmetro. Existem diferentes montagens a montante e a jusante do sensor na ventilação mecânica e espirometria, resultando em diferentes perfis de fluxo e perdas de carga. Assim, pode ser necessário repetir a análise para condições específicas de algumas aplicações.

## V. CONCLUSÃO

Pelos dados desse trabalho recomenda-se que a calibração seja feita em condições próximas daquela que o sensor será utilizado, de preferência com os mesmos sentidos de fluxos. Para trabalhos futuros pretende-se usar mais amostras de MOV e outros elementos de extensão, investigar os efeitos de escoamentos laminares e turbulentos no MOV e efeitos de mistura gasosas diferentes do ar atmosférico

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as CAPES, CNPq e FAPERJ pelo financiamento parcial desta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- [1] Schena, Emiliano, et al. "Flow measurement in mechanical ventilation: A review." *Medical engineering & physics* 37.3 (2015):257-264.
- [2] Graham, Brian L., et al. "Standardization of spirometry 2019 update. An official American thoracic society and European respiratory society technical statement." *American journal of respiratory and critical care medicine* 200.8 (2019): e70-e88.
- [3] Gilbey, John D., and Ming Wilson. "Measurement of gas flow and volume." *Anaesthesia & Intensive Care Medicine* (2020).
- [4] Macfarlane, Duncan J. "Open-circuit respirometry: a historical review of portable gas analysis systems." *European journal of applied physiology* 117.12 (2017): 2369-2386.
- [5] Massaroni, Carlo, et al. "Contact-based methods for measuring respiratory rate." *Sensors* 19.4 (2019): 908.
- [6] Finucane, KEVIN E., Bruce A. Egan, and Stanley V. Dawson. "Linearity and frequency response of pneumotachographs." *Journal of applied physiology* 32.1 (1972): 121-126.
- [7] Giannella-Neto, A., et al. "Design and calibration of unicapillary pneumotachographs." *Journal of applied physiology* 84.1 (1998): 335-343.
- [8] Montagna, Federica, et al. "Influence of the length of lead lines on the response of a variable orifice meter: analysis of sensitivity and settling time." 2018 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA). IEEE, 2018.