

## CONTROLE DA PRESSÃO AO FIM DA EXPIRAÇÃO IMPLEMENTADO EM MICROCONTROLADOR

D. R. G. Gonzalez\*, G. C. Motta-Ribeiro\*, F. C. Jandre\*

\*Laboratório de Engenharia Pulmonar/ Programa de Engenharia Biomédica / COPPE /  
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil  
e-mail: jandre@peb.ufrj.br

**Resumo:** O controle em malha fechada da pressão positiva ao final da expiração (PEEP) é um recurso desejado na ventilação mecânica de pequenos animais. Este trabalho propõe implementar um controlador de PEEP, externo ao ventilador, em um microcontrolador de baixo custo utilizando uma interface de operação simples. O controlador foi testado em simulação *hardware-in-the-loop*, considerando a titulação de PEEP, entre 0 e 10 cmH<sub>2</sub>O, em um rato. O tempo de subida foi menor que 5 ciclos, o sobrepasso menor que 0,7 cmH<sub>2</sub>O e o erro médio em regime permanente menor que 0,10 cmH<sub>2</sub>O, sugerindo a viabilidade desta solução para o controle de PEEP na ventilação de pequenos animais.

**Palavras-chave:** Ventilação Mecânica, PEEP, Controle Automático.

**Abstract:** *The closed-loop control of the positive end-expiratory pressure (PEEP) is a desired resource in small animals' mechanical ventilation. This work proposes an implementation of a PEEP controller, external to the ventilator, with a low cost microcontroller and using a simple interface. The controller was tested in a hardware-in-the-loop simulation, considering the PEEP titration, between 0 and 10 cmH<sub>2</sub>O, on a rat. The rising time was smaller than 5 cycles, the overshoot was smaller than 0.7 cmH<sub>2</sub>O and the mean steady-state error was smaller than 0.10 cmH<sub>2</sub>O, suggesting the viability of this solution for the PEEP control in small animals ventilation.*

**Keywords:** *Mechanical Ventilation, PEEP, Automatic Control.*

### Introdução

Modelos animais são vastamente empregados na pesquisa biomédica. No que tange à ventilação mecânica, muitos equipamentos comerciais para esses animais não apresentam parte dos recursos disponíveis em ventiladores para humanos como, por exemplo, controle interno da pressão positiva ao fim da expiração (PEEP). Neste caso, é necessário utilizar um mecanismo externo para gerar a PEEP. Um recurso simples e amplamente utilizado é uma coluna d'água, de forma que a expiração ocorre contra a PEEP desejada, de maneira semelhante à técnica de válvula com membrana utilizada em ventiladores para humanos.

Uma alternativa a essa técnica é a utilização de válvula expiratória tudo-ou-nada, a qual é totalmente aberta no início da expiração e totalmente fechada quando a PEEP desejada é alcançada [1]. Essa técnica (PEEP-válvula) parece possuir vantagens, em relação ao selo d'água, por não provocar oscilações de pressão, impor menor resistência à expiração e tender a incorporar parcelas inadvertidas da PEEP ao garantir vazão nula. Acrescenta-se ainda a menor complexidade, em relação à válvula com membrana, para a miniaturização necessária à ventilação de pequenos animais.

Utilizando um computador com uma placa de aquisição de dados interna, Giannella-Neto *et. al.* [2] adaptaram a técnica de PEEP-válvula a um ventilador para pequenos animais. Jardim-Neto *et. al.* [3] mostraram que existem ao menos vantagens práticas desta técnica em relação à coluna d'água. Tal controlador [2] já foi utilizado em diferentes trabalhos [3,4,5], porém a dependência de um PC com sistema de aquisição interno dificulta a replicação e ampliação de seu uso. O objetivo deste trabalho foi avaliar uma implementação em microcontrolador desse controlador.

### Materiais e métodos

O sistema respiratório (SR) de um animal paralisado em ventilação pulmonar mecânica pode ser modelado, simplificada, como um circuito resistivo-capacitivo em série com uma fonte (Figura 1).

Considerando-se um modo de ventilação controlado a volume, o ventilador é modelado por uma fonte de vazão como na Figura 1. A inspiração é controlada pelo aparelho posicionando-se a chave CH em I. A expiração ocorre passivamente com CH na posição E, apresentando fluxo e pressão exponenciais pela descarga do capacitor. A PEEP é controlada pela válvula PEEpv, que permite a expiração contra pressão ambiente quando fechada e interrompe completamente a vazão quando aberta. Esta interrupção faz com que o volume ao fim da expiração permaneça acima da capacidade residual funcional e, em consequência, a pressão no SR permaneça supra-atmosférica.

O valor da PEEP em regime permanente é determinado pelo tempo de expiração efetivo ( $\tau$ ). A solução trivial de interromper a expiração quando a pressão de boca se iguala a PEEP não é válida, pois esta medida contém a queda de pressão resistiva. Neste

trabalho,  $\tau$  é obtido com uma lei de controle adaptativa integral [2]. Esta é implementada de forma discreta a cada novo ciclo respiratório ( $k+1$ ) através de

$$\tau[k+1] = \tau[k] - g(\text{PEEPalvo}) \cdot T_{\text{exp}} \cdot e[k], \quad (1)$$

em que  $e[k] = (\text{PEEPalvo} - \text{PEEP}[k])$  é o erro,  $g(\text{PEEPalvo})$  é um ganho variável de acordo com a pressão desejada ( $\text{PEEPalvo}$ ),  $\text{PEEP}[k]$  é a média das últimas 30 amostras, obtidas a 1 kHz, de pressão do ciclo anterior e  $T_{\text{exp}}$  é o tempo expiratório total. O escalonamento do ganho é utilizado devido a não-linearidade que relaciona o tempo expiratório e a PEEP em regime. São considerados três intervalos de  $\text{PEEPalvo}$ , cada um associado a um ganho, menor quanto maior o valor da pressão [2]. Para evitar o efeito de *windup* [6] e melhorar o tempo de resposta do sistema,  $\tau$  é saturado com máximo em  $T_{\text{exp}}$  e mínimo em zero, ou um valor escolhido para garantir que haja uma expiração mínima.

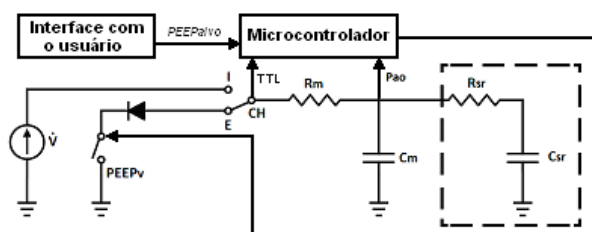


Figura 1 – Diagrama esquemático do controle e equivalente elétrico para um sistema respiratório linear sob ventilação mecânica.  $R_m$  e  $C_m$ : resistência e complacência das mangueiras de ventilação;  $R_{sr}$  e  $C_{sr}$ : resistência e complacência do sistema respiratório; CH: chave seletora de inspiração (fonte de vazão,  $\dot{V}$ ) e expiração (PEEP-válvula,  $\text{PEEP}_v$ ).

**Microcontrolador** – Neste trabalho, o controlador de PEEP proposto em Giannella-Neto *et. al.* [2] é implementado em um microcontrolador da família Atmega (Atmel, EUA), utilizando-se a plataforma Arduino. O microcontrolador utilizado é um ATmega328 presente em uma placa Arduino Uno. O Arduino é uma plataforma de prototipagem de hardware livre que possui um compilador próprio, de baixo consumo computacional e com uma sintaxe simplificada, desenvolvido com vistas a alcançar usuários que possuam menos familiaridade com programação, além de facilitar o acesso a portas e registradores.

A placa Arduino Uno utilizada possui 6 entradas analógicas e 14 entradas e saídas digitais, com disponibilidade de uso de PWM em 6. As entradas analógicas são limitadas entre 0 e 5 V, e possuem resolução de 10 bits. A placa possui, ainda, um conversor serial/USB permitindo a comunicação com um PC e fornecendo a tensão de alimentação da mesma. A conversão analógica/digital é baseada em uma referência de +5 V gerada pelo Arduino. Quando alimentado pela conexão USB, que fornece somente

estes 5 V, as perdas no circuito e variações de tensão no PC alteram esta referência. Para obter um valor mais estável, foi utilizada uma fonte de alimentação externa de 12 V e o valor da referência foi medido durante a inicialização utilizando-se como base uma tensão interna (1,1 V) ao microcontrolador.

**Implementação** – Uma das entradas analógicas da placa é conectada a um transdutor de pressão ligado à abertura de vias aéreas; uma das entradas digitais, a um sinal de sincronismo padrão TTL fornecido pelo ventilador mecânico indicando se este está em seu ciclo expiratório ou inspiratório; e uma das saídas digitais deve ser conectada à válvula, utilizada para interromper a expiração, por intermédio de um circuito de potência.

O microcontrolador foi programado na linguagem própria do Arduino, baseada em C/C++. Em sua etapa de inicialização (“setup”), o Arduino envia uma requisição para receber os três ganhos do controlador e o ganho do transdutor de pressão através da porta serial. Após a resposta à requisição, mede-se o sinal do transdutor durante 2 segundos e calcula-se a média, a qual representa a tensão referente à pressão zero. Uma vez inicializado, na etapa denominada “loop”, o controlador alterna entre o modo de inspiração e expiração, controlado pelo sinal TTL. O período entre iterações, de 1 ms, é imposto via *software*.

No início de cada inspiração, o Arduino atualiza o valor do tempo expiratório efetivo  $\tau$  e envia uma requisição para receber a  $\text{PEEPalvo}$  que será utilizada no próximo ciclo. Na fase de expiração o controlador conta o tempo decorrido, com resolução de 1 ms até atingir o valor de  $\tau$ . Neste instante, a válvula é fechada e interrompe-se a expiração. O sistema permanece neste estado até o sinal de sincronismo indicar uma nova inspiração, durante a qual a válvula é aberta.

**Interface com o usuário** - Como interface entre o usuário e o controlador de PEEP, podem ser utilizados os outros pinos de entrada analógica e digital do Arduino ou sua interface serial. Como exemplo, implementou-se um instrumento virtual em Labview (National Instruments, EUA) que se comunica com o microcontrolador através da porta USB. Essa interface apresenta múltiplas funcionalidades, sendo utilizada para selecionar a  $\text{PEEPalvo}$  enviada a cada ciclo, assim como os três ganhos escalonados da lei de controle e o ganho do transdutor utilizado na medição de pressão de boca. Nela também são registrados os valores de  $\text{PEEPalvo}$  enviados e o momento de cada envio, para uma posterior análise dos dados.

A interface possui três modos de envio de PEEP: manutenção, titulação em degraus ou titulação em rampa. Nessa implementação, a  $\text{PEEPalvo}$  varia entre 0 e 10  $\text{cmH}_2\text{O}$ , com resolução de 0,1  $\text{cmH}_2\text{O}$ .

No modo de manutenção, o usuário escolhe uma PEEP fixa e a cada requisição do controlador, esse valor de PEEP é enviado. Na titulação em degraus, o usuário preenche uma tabela com diferentes valores de PEEP e o tempo desejado para cada valor escolhido. Cada valor de PEEP é enviado durante o período estabelecido. Na titulação em rampa [4], o usuário seleciona uma faixa de

valores de PEEP e o tempo de duração da titulação. Essa faixa é dividida pelo tempo total em valores iguais e, a cada requisição do controlador, uma nova PEEP é enviada até que seja atingido o valor final no tempo determinado. Após ambas as titulações, a interface volta a enviar a PEEP selecionada no modo de manutenção.

**Testes** - O funcionamento do controlador de PEEP durante a ventilação mecânica foi simulado utilizando-se *hardware-in-the-loop*. A simulação foi implementada em Simulink (MathWorks, EUA) com a ferramenta Real-time Windows, método de integração Runge-Kutta de 4ª ordem e passo fixo de 0,5 ms. Na simulação, implementou-se o modelo da Figura 1, o qual gera o sinal do transdutor de pressão e o sinal de sincronismo, recebendo como entrada o sinal de controle da válvula tudo-ou-nada. Para transmissão e recepção desses sinais, foi utilizada uma placa de aquisição de dados PCI-6221 (National Instruments) conectada a um bloco de conexões CB-68LP (National Instruments).

Considerou-se a ventilação de um rato, com parâmetros de mecânica respiratória  $Rsr = 0,23 \text{ cmH}_2\text{O.s/ml}$  e  $Csr = 0,25 \text{ ml/cmH}_2\text{O}$  [7]. Os ajustes de ventilação foram volume corrente de 1,8 ml e frequência respiratória de 80 ciclos/min com relação de 1:2 entre os tempos inspiratório e expiratório. O circuito do ventilador foi considerado desprezível em relação ao SR do animal,  $Rm = 0 \text{ cmH}_2\text{O.s/l}$  e  $Cm = \infty \text{ ml/cmH}_2\text{O}$ .

Os ganhos foram ressintonizados a partir dos valores originais de [2], utilizando-se a mesma estrutura de simulação. Os três intervalos de PEEP, abertos no patamar superior são: 0 a 2; 2 a 6; e 6 a 10 cmH<sub>2</sub>O, sendo seus respectivos ganhos 0,06, 0,02 e 0,01.

Para testar o controlador e a interface foram realizadas três titulações de PEEP: de 0 a 10 cmH<sub>2</sub>O e retornando a 0 cmH<sub>2</sub>O, utilizando o modo de titulação em degraus, variando 1 cmH<sub>2</sub>O a cada minuto. Também foi realizada uma titulação em rampa, variando de 10 a 0 cmH<sub>2</sub>O, com tempo de duração total de 1 minuto. Os valores de PEEP medidos na simulação foram gravados e depois sincronizados com os valores de *PEEPalvo* enviados pelo Labview. Para análise do desempenho do controlador considerou-se tempo de subida (instante em que a PEEP atinge 95% da referência), sobrepasso e o erro médio em relação a cada valor de referência.

## Resultados

As Figuras 2 e 3 apresentam os valores de PEEP durante as fases ascendente e descendente de uma das titulações em degraus, respectivamente. A Figura 4 apresenta os valores de PEEP durante a titulação em rampa. Os pontos representam a PEEP medida a cada ciclo respiratório, a linha azul é a *PEEPalvo* e as linhas vermelhas representam o intervalo da variação de 5%, na titulação em degraus, ou 0,5 cmH<sub>2</sub>O, na titulação em rampa, sobre esta pressão.

Observa-se, nas Figuras 2 e 3, que em regime permanente os valores de PEEP permanecem dentro do limite determinado em vermelho. Os sobrepassos foram

menores que 0,5 cmH<sub>2</sub>O, para PEEP até 8 cmH<sub>2</sub>O e 0,7 cmH<sub>2</sub>O para as demais.

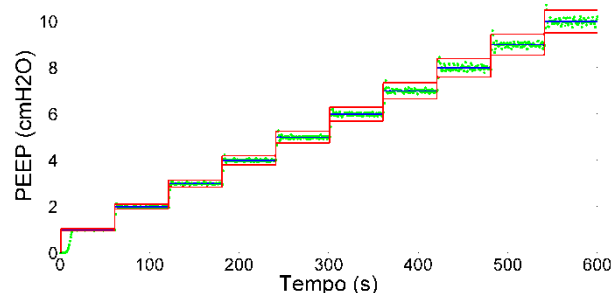


Figura 2 - Intervalo de 0 a 10 cmH<sub>2</sub>O dos valores enviados da *PEEPalvo* e PEEP medida. Pontos: PEEP medida a cada ciclo; Linhas: *PEEPalvo* (azul) e margem de 5% (vermelho).

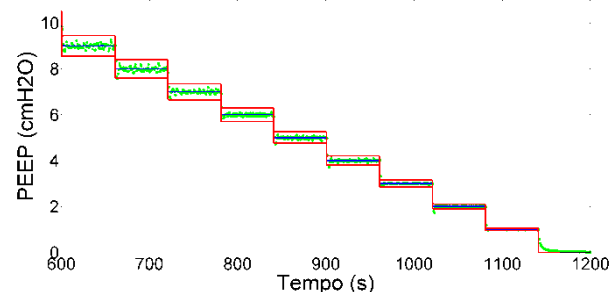


Figura 3 - Intervalo de 10 a 0 cmH<sub>2</sub>O dos valores enviados de *PEEPalvo* e da PEEP medida. Para detalhes, ver legenda da Figura 2.

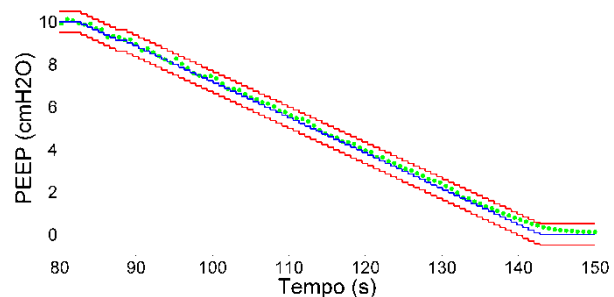


Figura 4 - Valores de *PEEPalvo* e da PEEP medida na titulação em rampa entre 10 a 0 cmH<sub>2</sub>O. Pontos: PEEP medida a cada ciclo; Linhas: *PEEPalvo* (azul) e margem de 0,5 cmH<sub>2</sub>O (vermelho).

Na titulação em rampa, observa-se que os valores de PEEP permanecem dentro do limite de 0,5 cmH<sub>2</sub>O representado em vermelho.

## Discussão

O controlador apresentou um desempenho aceitável, comparado à implementação anterior [2], em relação à PEEP desejada e a obtida. O erro médio foi igual ou menor que 0,05 cmH<sub>2</sub>O para valores de até 5 cmH<sub>2</sub>O e menor que 0,10 cmH<sub>2</sub>O para valores entre 6 e

10 cmH<sub>2</sub>O. O maior tempo de subida foi igual a 4 ciclos respiratórios, com exceção do primeiro degrau (1 cmH<sub>2</sub>O), que demorou 19 ciclos para atingir a faixa desejada. Os valores de sobrepasso obtidos nas simulações (até 0,7 cmH<sub>2</sub>O) são menores que os apresentados anteriormente (1,0 cmH<sub>2</sub>O, máximo para a PEEP de 10 cmH<sub>2</sub>O) [2]. Na titulação em rampa, variando a *PEEPalvo* de 10 a 0 cmH<sub>2</sub>O em 1 minuto, nenhum valor de PEEP medido ficou fora da faixa limite. Entretanto, destaca-se que apesar de a simulação *hardware-in-the-loop* apresentar um bom modelo de ventilação artificial, para uma melhor comparação e validação dos resultados são necessários experimentos "in vitro" / in vivo.

O maior tempo de subida para as transições de 0 para 1 cmH<sub>2</sub>O e de 1 para 0 cmH<sub>2</sub>O, tanto na titulação em degraus como em rampa, sugere que o ganho pode estar pequeno para esta faixa de PEEP. Todavia este parâmetro também depende da constante de tempo do SR e de *Texp*. Devido ao comportamento exponencial da expiração, as variações de  $\tau$  na região de menores pressões levam a pequenas variações de pressão, obrigando passos maiores do controlador.

Observa-se, nas Figuras 2 e 3, que ocorre oscilação em regime permanente, sendo maiores as oscilações em maiores PEEP. Embora desvios menores que 0,5 cmH<sub>2</sub>O sejam aceitáveis para um controle de PEEP comercial, os valores medidos se comportaram de forma aparentemente ruidosa, mesmo sem adição proposital de ruído na simulação. Duas hipóteses foram formuladas para explicar esse comportamento. A primeira se refere ao fato de o microprocessador Atmel utilizado pelo Arduino possuir um conversor A/D com resolução de 10 bits. Quanto maior a faixa de pressão medida, menor será a resolução de  $PEEP[k]$ . Esse erro de quantização na medição pode afetar o cálculo do tempo para fechamento da válvula, provocando variação nos valores de PEEP obtidos.

A segunda hipótese se relaciona à incerteza da medida de tempo pelo Arduino com o código desenvolvido, cerca de 2% na frequência de 1 kHz. Uma contagem errada do tempo de fechamento da válvula pode levar a uma PEEP diferente da desejada. Com o sistema em malha fechada, o mesmo tende a oscilar. Caso se confirme essa hipótese, pode ser necessária uma nova forma de medir o tempo expiratório decorrido até o fechamento da válvula, por exemplo, utilizando rotinas de interrupção via temporizador.

**Limitações** – Caso a hipótese de valores desprezíveis para a mecânica do circuito do ventilador não seja válida, a interação deste com o SR pode levar a uma expiração mais lenta. Assim, pode ser necessário reajustar os valores de ganho.

Os resultados obtidos apresentaram oscilação em regime. Esta pode estar ligada ao período de amostragem da simulação e à imprecisão na contagem de tempo pelo Arduino. Entretanto, na aplicação real, o controle estará sujeito ao atraso entre o acionamento e o fechamento da válvula, não modelado na simulação.

O tempo de subida para degraus entre 0 e 1 cmH<sub>2</sub>O é elevado, porém depende, além dos ganhos, dos parâmetros de mecânica do SR. Um aumento do ganho para esta faixa pode reduzir este tempo, mas também aumentar a oscilação e o erro de regime. A sensibilidade a diferentes ajustes de ventilação e SR precisa ser verificada em novos experimentos.

## Conclusão

Neste estudo inicial a implementação da técnica de PEEP-válvula, utilizando-se um microcontrolador com o Arduino, desempenhou o controle de PEEP com boa qualidade, sendo ainda necessários aprimoramentos, conforme discutido acima. Os parâmetros analisados (tempo de subida, sobrepasso e erro médio) estão dentro da faixa aceitável quando comparados à implementação anterior [2]. Essa nova versão pode ser uma alternativa de menor custo, maior portabilidade e possível integração com ventiladores. Ensaios com modelos físicos são necessários para confirmar os resultados antes de seu uso *in vivo*.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, CAPES e FAPERJ pelo financiamento parcial do projeto.

## Referências

- [1] Pino AV, Giannella-Neto A. A new method to obtain positive end-expiratory pressure. In: Proc. 18<sup>th</sup> Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Medicine and Biology Soc., 1996, Amsterdam, Holanda, vol.4, p.1689-90.
- [2] Giannella-Neto A, Motta-Ribeiro GC, Santos EL, et al.. Control of positive end-expiratory pressure (PEEP) for small animal ventilators. BioMedical Eng. Online, 2010, 9: 36.
- [3] Jardim-Neto AC, Carvalho NS, Carvalho AR, et al.. 'PEEP válvula' versus 'PEEP selo d'água': mecânica ventilatória em ratos saudáveis. In: Proc. 22<sup>o</sup> Cong. Brasileiro de Engenharia Biomédica, 2010, Tiradentes, Brasil. p. 1220-23.
- [4] Carvalho NS, Jardim-Neto AC, Mancin, VGL, et al.. Influência do tempo na titulação da pressão positiva ao final da expiração e repercussões hemodinâmicas. In: Proc. 22<sup>o</sup> Cong. Brasileiro de Engenharia Biomédica, 2010, Tiradentes, Brasil. p. 1031-34.
- [5] Bergamini BC, Cagido, VR, Carvalho NS, et al.. Titration of Positive End-Expiratory Pressure Based on a Volume-Independent Elastance. In: Proc. 23<sup>rd</sup> Annu. Cong. European Soc. of Intensive Care Medicine, 2010, Barcelona, Espanha. v. 36. p. S216.
- [6] Astrom KJ e Murray RM, Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers, Princeton University Press, 2010.
- [7] King TK, Mechanical properties of the lungs in the rat, J. Appl. Physiol., 1966, 21(1): 259-64.