

CONTROLE A ESTRUTURA VARIÁVEL DA VAZÃO DE UMA BOMBA PERISTÁLTICA

GABRIEL TAVARES DE MELO*, JOSÉ PAULO V. S. DA CUNHA*, JOSÉ FRANCO M. DO AMARAL*

*Departamento de Eletrônica e Telecomunicações — Faculdade de Engenharia
Universidade do Estado do Rio de Janeiro — Rua São Francisco Xavier 524, sala 5001E — 20550-900

Emails: gabrielmelo@yahoo.com.br, jpaulo@ieee.org, franco@uerj.br

Abstract— Two algorithms are developed for the accurate control of the flow rate of a peristaltic pump: proportional and variable structure. The objective is to improve the infusion of drugs. The totalized number of drops is feedback in order to achieve closed-loop control. Variable structure control achieves better performance, which is verified theoretically and in simulation results. Experimental results obtained with a microcontroller based prototype are also presented.

Keywords— Flow control, Peristaltic pump, Infusion pump, Variable structure control, Computer control.

Resumo— São desenvolvidas duas estratégias para o controle preciso da vazão de uma bomba peristáltica: proporcional e a estrutura variável. O objetivo é melhorar a infusão de medicamentos em pacientes. Para realizar o controle em malha fechada, realimenta-se a totalização das gotas detetadas por um dosador. O controle a estrutura variável produz um desempenho melhor, o que é verificado teoricamente e por meio de simulações. Também são apresentados resultados experimentais de um protótipo implementado com um microcontrolador.

Palavras-chave— Controle de vazão, Bomba peristáltica, Bomba de infusão, Controle a estrutura variável, Controle por computador.

1 Introdução

As bombas para a infusão de medicamentos em pacientes são adotadas em terapias em que a infusão por gravidade não proporciona resultados satisfatórios em consequência da irregularidade da quantidade infundida e da pouca uniformidade da taxa de infusão. O controle preciso da vazão é importante, por exemplo, na infusão de medicamentos vasoativos potentes, que seriam difíceis ou perigosos de se ministrarem pela infusão por gravidade.

Usualmente são empregadas bombas peristálticas (Klespitz and Kovács, 2014) que geram uma vazão proporcional à velocidade de rotação de seu motor. A Figura 1 apresenta um tipo de bomba peristáltica em que três roletes, montados sobre um disco giratório, comprimem um tubo flexível. O movimento dos roletes por fora do tubo bombeia o líquido que está bloqueado entre dois desses roletes.

Boa parte das bombas de infusão opera em malha aberta, o que é feito ajustando-se a velocidade do motor para gerar a vazão desejada (Kommu et al., 2014). Para que a vazão seja adequada, é necessário que as características dos diversos componentes da bomba (e.g., diâmetro e flexibilidade do tubo) sejam precisas (Klespitz and Kovács, 2014). Seria desejável aliviar o requisito de precisão, especialmente porque o tubo é descartado após cada operação, portanto, é importante reduzir seu custo.

Diferentes técnicas de medição e controle de vazão de bombas peristálticas podem ser encontradas na literatura. Em (de Maré et al., 2001), é utilizado o balanço de massa do recipiente que

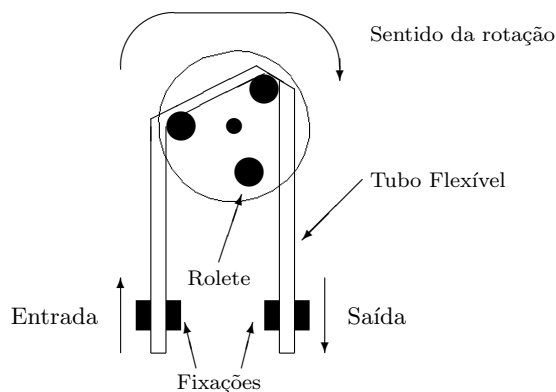


Figura 1: Bomba peristáltica.

contém o fluido utilizado na infusão. Através da taxa de variação da massa no recipiente, é possível estimar-se a vazão de saída. Este método, além de necessitar do uso de balanças de alta precisão, requer tratamentos para mitigar o efeito de perturbações e vibrações na medida. Outros exemplos são o uso de controle preditivo em (Hu and Chen, 2013) e controle repetitivo em (Hillerström and Sternby, 1994).

Várias bombas de infusão já utilizam um dosador que mede a vazão a partir da contagem de gotas detetadas por um fototransistor, conforme a Figura 2. Geralmente a contagem de gotas é utilizada apenas para monitorar a operação do equipamento (Yubin et al., 2010), o que é feito verificando se a vazão está dentro de limites toleráveis. Riscala e Moreira (1997) propuseram a utilização da contagem de gotas para o controle de vazão em malha fechada. A partir dessa concep-

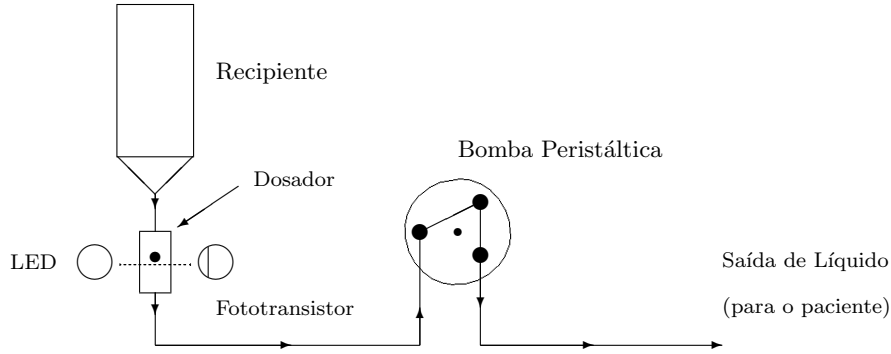


Figura 2: Bomba de infusão com seus elementos básicos.

ção, neste artigo modela-se a dinâmica da bomba de infusão na seção 2 para permitir o estudo de três estratégias de controle (seção 3): (i) malha aberta, (ii) proporcional e (iii) estrutura variável. Na seção 4 avalia-se o efeito da natureza quantizada da contagem de gotas no desempenho das duas estratégias de controle em malha fechada. Na seção 5 são apresentados resultados de simulação que auxiliam a avaliação do desempenho de cada estratégia. Na seção 6 relatam-se os resultados alcançados com um protótipo implementado com um microcontrolador.

2 Modelo da Dinâmica

O principal componente desta bomba de infusão é uma bomba peristáltica que retira líquido de um recipiente pela compressão de um tubo flexível. O tubo é comprimido por roletes acionados por um motor de passo. Uma grande vantagem da utilização do motor de passo é que a sua velocidade $\omega(t)$ (em rad/s) pode ser controlada com precisão, mesmo em malha aberta, pela frequência dos pulsos de acionamento $u(t)$ (em Hz), que será adotada como variável de controle. Assumindo-se que o movimento de rotação é contínuo, tem-se:

$$\omega(t) = K_m u(t), \quad (1)$$

na qual K_m (rad) é o ângulo de rotação de um passo do motor. O refluxo do líquido deve ser evitado para não comprometer a saúde do paciente. Por isto, a rotação do motor deve ser unidirecional e o controle deve ser limitado ($u(t) \geq 0, \forall t \geq 0$).

Antes de circular pela bomba, o líquido passa por um dosador que pinga gotas que são contadas para a medição da vazão. A vazão da bomba, proporcional à velocidade de rotação, é integrada, resultando no número de gotas ($n_g(t)$) que passam pelo dosador:

$$\dot{n}_g(t) = v_g(t) = K_b(t) \omega(t), \quad t \geq 0, \quad (2)$$

na qual $v_g(t)$ (gota/s) é a vazão de saída da bomba peristáltica e $K_b(t)$ (gota/rad) é o coeficiente de

vazão da bomba. O modelo da dinâmica da bomba de infusão é representado pelo diagrama na Fig. 3.

A variável medida é o número total de gotas (n_{gq}). Apesar de se considerar em boa parte da análise dos controladores que este é um sistema linear, o número total de gotas é uma medida quantizada ($n_{gq}(t) \in \mathbb{N}$), o que o torna não linear. No entanto, a simplificação linear é justificada pois o número de gotas que passam pelo dosador ao longo de um grande intervalo de tempo é muito grande, então $n_{gq}(t) \approx n_g(t) \in \mathbb{R}^+$. Na seção 4 analisa-se o efeito da quantização da medida.

Assume-se que o coeficiente $K_b(t)$ é uma função contínua por partes. Usualmente não é conhecido precisamente, mas é limitado por constantes conhecidas ($K_{b\min}, K_{b\max}$):

$$0 < K_{b\min} < K_b(t) < K_{b\max}, \quad \forall t \geq 0. \quad (3)$$

3 Controle de Vazão

3.1 Controle em malha aberta

Usualmente o controle de vazão de bombas peristálticas é realizado ajustando-se a velocidade de rotação do motor (Kommur et al., 2014). Nesta estratégia tipo *feedforward* assume-se que o coeficiente de vazão da bomba é o nominal $\bar{K}_b$ (i.e., $K_b(t) \equiv \bar{K}_b$) e o volume de cada gota é constante e conhecido. Calcula-se a frequência de controle do motor para a vazão desejada (v_{gref} em gota/s):

$$u(t) = \frac{v_{gref}(t)}{K_m \bar{K}_b}. \quad (4)$$

3.2 Controle proporcional

O coeficiente de vazão $K_b(t)$ é bastante dependente dos seguintes fatores: diâmetro e flexibilidade do tubo da bomba peristáltica; volume de cada gota; temperatura, viscosidade e densidade do líquido; pressão na saída e na entrada da bomba. Para tornar o sistema menos sensível a variações do coeficiente de vazão $K_b(t)$, acrescenta-se à ação em malha aberta (4) um termo de reali-

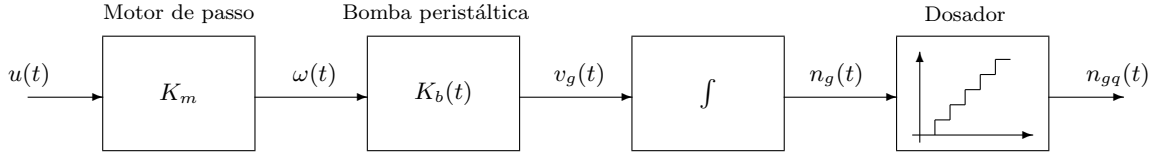


Figura 3: Diagrama de blocos do modelo da dinâmica da bomba de infusão.

mentação proporcional:

$$u(t) = \frac{v_{gref}(t)}{K_m \bar{K}_b} + K_p e(t), \quad (5)$$

na qual $K_p > 0$ é o ganho proporcional. Escolheu-se o erro das gotas totalizadas dado por:

$$e(t) = \int_0^t v_{gref}(\tau) d\tau - n_g(t), \quad (6)$$

por ser menos sensível a erros de quantização do que a diferenciação numérica que seria necessária para estimar o erro de vazão ($v_{gref}(t) - \dot{n}_g(t)$).

Para analisar a estabilidade do controle proporcional em malha fechada, lembra-se a equação dinâmica da malha aberta (vide (1) e (2)):

$$\dot{n}_g(t) = v_g(t) = K_m K_b(t) u(t). \quad (7)$$

Derivando-se (6) obtém-se:

$$\dot{e}(t) = v_{gref}(t) - \dot{n}_g(t). \quad (8)$$

Substituindo-se (7) e (5) em (8), obtém-se a equação dinâmica do erro:

$$\dot{e}(t) = -K_m K_b(t) K_p e(t) + v_{gref}(t) \left(\frac{\bar{K}_b - K_b(t)}{\bar{K}_b} \right). \quad (9)$$

Analisando-se (9), conclui-se que se $K_b(t) \equiv \bar{K}_b$, uma vez que $K_m \bar{K}_b K_p > 0$, então $e(t) \rightarrow 0$ exponencialmente à medida que $t \rightarrow +\infty$. Caso $K_b(t)$ difira do valor nominal, o erro é limitado por (conforme é demonstrado no Apêndice A):

$$|e(t)| \leq |e(0)| \exp(-K_m K_{b \min} K_p t) + \frac{\sup_{t \geq 0} (v_{gref}(t)) \sup_{t \geq 0} |\bar{K}_b - K_b(t)|}{K_m K_{b \min} K_p \bar{K}_b}. \quad (10)$$

Avaliando-se este majorante, percebe-se que a influência do erro inicial ($e(0)$) é eliminada à medida que $t \rightarrow +\infty$. Além disso, o erro máximo pode ser reduzido escolhendo-se um valor grande para K_p , como seria de se esperar.

3.3 Controle a estrutura variável

Para se obter um melhor desempenho na rejeição de perturbações e robustez a variações paramétricas, propõe-se o uso da lei de controle a estrutura

variável (Utkin et al., 1999):

$$u(t) = \begin{cases} [(K_{b \min} - \delta) K_m]^{-1} v_{gref}(t), & e(t) > 0, \\ [(K_{b \max} + \delta) K_m]^{-1} v_{gref}(t), & e(t) < 0, \end{cases} \quad (11)$$

na qual $\delta > 0$ é uma constante arbitrada. Para se evitar que o sinal de controle seja negativo é necessário que $\delta < K_{b \min}$.

Para se mostrar a estabilidade e o desempenho desta lei de controle, utiliza-se a função de Lyapunov:

$$V(e) = \frac{e^2}{2}, \quad (12)$$

cujas derivada em relação ao tempo, obtida a partir de (7) e (8), é:

$$\dot{V}(e) = e(t) \dot{e}(t) = e(t) [v_{gref}(t) - \dot{n}_g(t)] = e(t) [v_{gref}(t) - K_m K_b(t) u(t)]. \quad (13)$$

Substituindo-se a lei de controle (11) em (13):

$$\dot{V}(e) = \begin{cases} e(t) v_{gref}(t) \left(1 - \frac{K_b(t)}{K_{b \min} - \delta} \right), & e(t) > 0, \\ e(t) v_{gref}(t) \left(1 - \frac{K_b(t)}{K_{b \max} + \delta} \right), & e(t) < 0, \end{cases} \quad (14)$$

concluindo-se que $\dot{V} < 0$ ($e \neq 0$), logo o erro tende para a superfície de deslizamento $e = 0$. Se adicionalmente $v_{gref}(t) > v_{gref \min} > 0, \forall t \geq 0$, ($v_{gref \min}$ é uma constante arbitrária) o erro alcançará a superfície de deslizamento em tempo finito e permanecerá nesta a partir de então.

4 Efeitos da Natureza Quantizada da Contagem de Gotas

A contagem de gotas é uma medição quantizada por truncamento que acarreta um erro na medição do volume bombeado n_g de até uma gota, isto é:

$$n_g(t) = n_{gq}(t) + \epsilon(t), \quad (15)$$

na qual o erro de truncamento é $0 \leq \epsilon(t) < 1$ (Franklin et al., 1990). Nesta seção é analisado o efeito desta quantização no desempenho dos controladores proporcional e a estrutura variável.

4.1 Efeito no controlador proporcional

O ganho proporcional K_p amplifica o erro de truncamento $\epsilon(t)$, o que causa um desvio no sinal de controle $u(t)$ igual a $K_p \epsilon(t)$. Uma vez que o erro

de truncamento máximo é uma gota, a cada totalização de gota é gerado um salto no sinal de controle com amplitude $\Delta u = K_p$. Portanto, a velocidade de rotação do motor e, consequentemente, a vazão de saída da bomba sofrerão oscilações com amplitudes proporcionais ao ganho do controlador. Para que o erro de rastreamento seja pequeno, é necessário escolher um valor grande para K_p (vide eq. (10)), o que requer um compromisso de projeto entre o erro de rastreamento tolerável e a uniformidade desejada para a vazão.

4.2 Efeito no controlador a estrutura variável

No controlador a estrutura variável (11) a amplitude da oscilação do sinal de controle,

$$\Delta u = \left(\frac{1}{(K_{b\min} - \delta)K_m} - \frac{1}{(K_{b\max} + \delta)K_m} \right) v_{gref}, \quad (16)$$

é independente do erro de truncamento se a vazão de referência v_{gref} for mantida constante. Se a faixa de variação do parâmetro K_b for pequena, pode-se escolher valores próximos para $K_{b\min}$ e $K_{b\max}$, o que reduz a amplitude das oscilações e melhora a uniformidade da vazão de saída, o que se conclui da eq. (16). Essa amplitude também será pequena se a vazão desejada for baixa, o que é uma vantagem do controlador a estrutura variável sobre o controlador proporcional, pois este último gera oscilações com amplitudes independentes da vazão desejada, relativamente grandes para pequenas vazões. Por outro lado, o erro de rastreamento do controlador proporcional aumenta para vazões grandes se os parâmetros da bomba não forem os nominais (vide eq. (10)), enquanto que o erro será mantido bastante pequeno pelo controlador a estrutura variável.

5 Resultados de Simulações

Nesta seção são apresentados resultados de simulações para possibilitar a comparação de desempenho do controlador proporcional (Figs. 4 e 6) com o controlador a estrutura variável (Figs. 5 e 7). Os parâmetros do controlador proporcional são: $K_p = 20$ e $\bar{K}_b = 1,768$ gota/rad. Os parâmetros do controlador a estrutura variável são: $K_{b\min} - \delta = 1,5$ gota/rad e $K_{b\max} + \delta = 2,5$ gota/rad. O passo do motor é $K_m = 0,01571$ rad ($0,9^\circ$). O coeficiente de vazão da bomba $K_b(t) \equiv 1,55$ gota/rad difere do nominal em aproximadamente 12%.

Em baixa vazão ($v_{gref} = 0,25$ gota/s) é evidente que a amplitude das oscilações do sinal de controle a estrutura variável (Fig. 5) é menor que a resultante do controle proporcional (Fig. 4).

Se a vazão de referência for grande ($v_{gref} = 4,0$ gotas/s), a amplitude das oscilações do sinal de controle a estrutura variável (Fig. 7) é um pouco maior que a amplitude das oscilações do

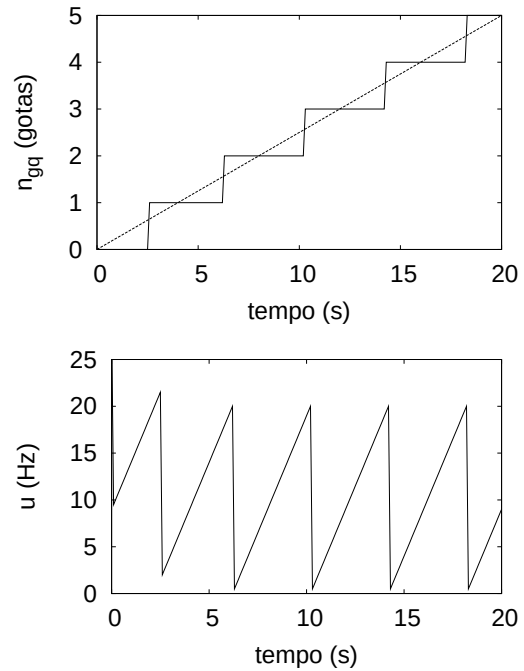


Figura 4: Simulação do controlador proporcional com vazão de referência $v_{gref} = 0,25$ gota/s. Sinal de referência tracejado.

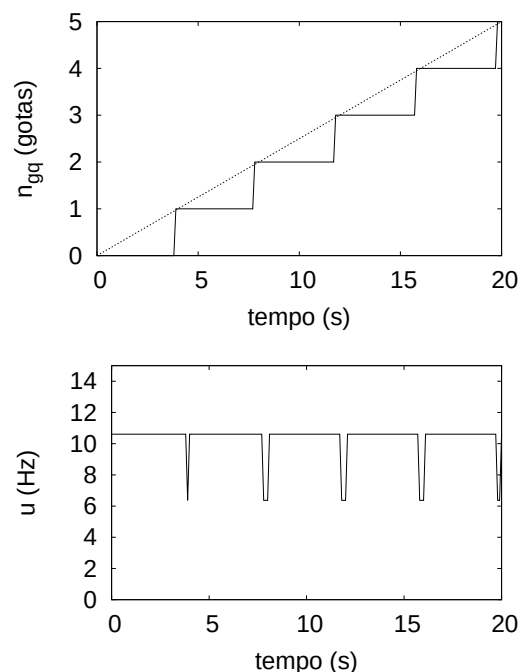


Figura 5: Simulação do controlador a estrutura variável com vazão de referência $v_{gref} = 0,25$ gota/s. Sinal de referência tracejado.

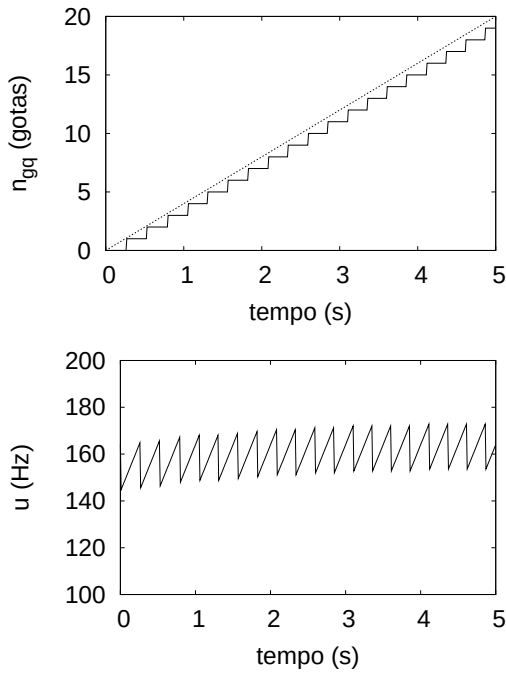


Figura 6: Simulação do controlador proporcional com vazão de referência $v_{gref} = 4,0$ gotas/s. Sinal de referência tracejado.

controle proporcional (Fig. 6). Outro problema é que o controlador proporcional permite que o erro de rastreamento nas gotas totalizadas (n_{gg} na Fig. 6) aumente na medida que a vazão aumenta. Para reduz -lo foi necessário o uso de um ganho proporcional grande.

O controlador a estrutura variável é o mais adequado à bomba de infusão, pois o erro de rastreamento é inferior a uma gota independentemente da vazão de referência. Além disso, a relação entre a amplitude da oscilação do sinal de controle e o seu valor médio se mant m para qualquer valor da vazão de referência, o que indica sua adequação em diversas condições de operação.

6 Resultados Experimentais

O controlador foi implementado em um microcontrolador Atmel 89C52, da família 8051, com *clock* de 7,3728 MHz (Riscala e Moreira, 1997). A elaboração do *software* foi facilitada pela simplicidade do algoritmo a estrutura variável e pela baixa velocidade do processo controlado. O pulso gerado pelo fototransistor do dosador, após devidamente condicionado, é aplicado a uma entrada de interrupção que ativa a rotina de contagem de gotas. O microcontrolador gera diretamente os pulsos de excitação dos transistores que acionam o motor de passo na frequência determinada pelo algoritmo de controle.

A Figura 8 apresenta um resultado obtido com $v_{gref} = 0,15$ gota/s. No controlador foram usados os seguintes parâmetros: $K_m = 0,0314$ rad

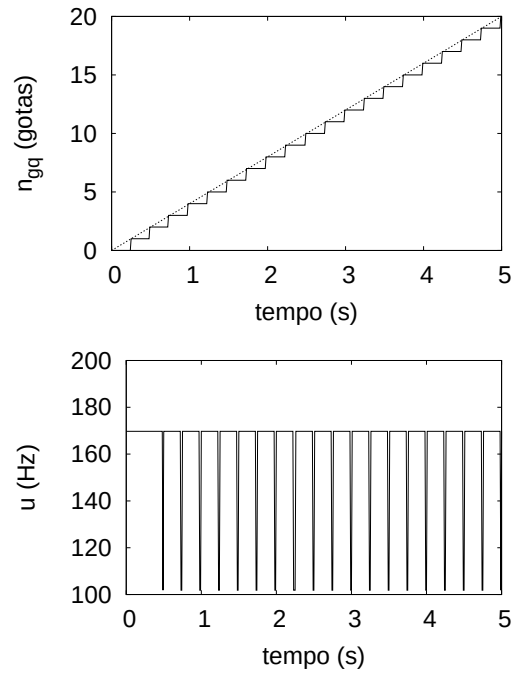


Figura 7: Simulação do controlador a estrutura variável com vazão de referência $v_{gref} = 4,0$ gotas/s. Sinal de referência tracejado.

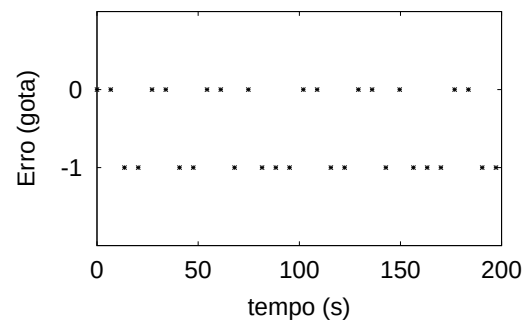


Figura 8: Experimento realizado com o protótipo. Resposta do erro de rastreamento para vazão de referência $v_{gref} = 0,15$ gota/s.

($1,8^\circ$), $K_{b\min} - \delta = 1,41$ gota/rad e $K_{b\max} + \delta = 2,36$ gota/rad. O erro de rastreamento obtido experimentalmente foi semelhante ao esperado, no máximo uma gota. Entretanto, noutras sequências de testes foi observado o gotejamento em alguns instantes irregulares (e.g., imediatamente após a queda de outra gota), acarretando erros de rastreamento de até duas gotas. Acredita-se que isto seja consequência de deficiências na montagem, provavelmente o desalinhamento do eixo de rotação da bomba.

7 Conclusão

Foram apresentados alguns resultados sobre o controle de vazão de uma bomba peristáltica tendo em vista sua aplicação em bombas de infusão uti-

lizadas na administração de medicamentos.

As estratégias de controle proporcional e a estrutura variável foram comparadas teoricamente e com auxílio de simulações. O controle a estrutura variável resultou no melhor desempenho pois produz vazões mais uniformes que o controle proporcional. O controle proporcional gera oscilações que podem ser intoleráveis no sinal de controle da bomba e na vazão, especialmente se a vazão desejada for pequena. Isto é causado pela quantização da medição feita pelo contador de gotas em conjunto com o alto ganho do controlador, que é necessário para reduzir o erro de rastreamento.

A implementação de ambos algoritmos é simples, o que favorece o uso de microcontroladores com pouca capacidade de processamento.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à fabricante de equipamentos biomédicos Braun (São Gonçalo, RJ), que cedeu alguns componentes para a construção do protótipo. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq, CAPES e FAPERJ.

Referências

- de Maré, L., Velut, S., Hagander, P. and Åkesson, M. (2001). Feedback control of flow rate from a peristaltic pump using balance measurements, *Proc. European Contr. Conf.*, Porto, pp. 2164–2168.
- Franklin, G. F., Powell, J. D. and Workman, M. L. (1990). *Digital Control of Dynamic Systems*, 2nd edn, Addison-Wesley.
- Hillerström, G. and Sternby, J. (1994). Application of repetitive control to a peristaltic pump, *ASME J. of Dynamics Systems Measurement and Contr.* **116**(4): 786–789.
- Hu, G.-F. and Chen, L.-G. (2013). Application of generalized predictive control to a peristaltic pump, *Applied Mechanics and Mechanical Engineering III*, Vol. 249 of *Applied Mechanics and Materials*, Trans. Tech. Publications, pp. 572–576.
- Klespitz, J. and Kovács, L. (2014). Peristaltic pumps — A review on working and control possibilities, *Proc. IEEE 12th Int. Symp. Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI)*, Herl'any, Slovakia, pp. 191–194.
- Kommu, A., Kanchi, R. R. and Uttarkar, N. K. (2014). Design and development of microcontroller based peristaltic pump for automatic potentiometric titration, *Int. Conf. Communications and Signal Processing (ICCSP)*, Melmaruvathur, India, pp. 157–161.

Riscala, A. G. e Moreira, F. (1997). Protótipo microprocessado de uma bomba de infusão, Projeto de Graduação em Engenharia Eletrônica — UERJ, Rio de Janeiro.

Utkin, V., Guldner, J. and Shi, J. (1999). *Sliding Mode Control in Electromechanical Systems*, Taylor & Francis Ltd., London.

Vidyasagar, M. (1978). *Nonlinear Systems Analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Yubin, Z., Yunping, Y., Zhengang, W., Wenbin, Z., Yu, C. and Hao, L. (2010). Research on intelligent infusion device control system based on chip microcomputer, *Proc. Int. Forum Information Technology and Applications (IFITA)*, Vol. 1, Kunming, China, pp. 301–304.

A Majorante do Erro para o Controlador Proporcional

Seguindo (Vidyasagar, 1978, p. 93), a seguinte desigualdade é válida para a equação do erro (9):

$$|e(t)| \leq \exp \left(\int_0^t -K_m K_b(\tau) K_p d\tau \right) |e(0)| + \int_0^t \exp \left(\int_\tau^t -K_m K_b(s) K_p ds \right) \times \left| v_{ref}(\tau) \frac{\bar{K}_b - K_b(\tau)}{\bar{K}_b} \right| d\tau, \quad (17)$$

da qual decorre a sequência de majorantes:

$$|e(t)| \leq \exp \left(\int_0^t -K_m K_{bmin} K_p d\tau \right) |e(0)| + \int_0^t \exp \left(\int_\tau^t -K_m K_{bmin} K_p ds \right) \times \sup_{t \geq 0} \left| v_{ref}(t) \frac{\bar{K}_b - K_b(t)}{\bar{K}_b} \right| d\tau = \exp(-K_m K_{bmin} K_p t) |e(0)| + \int_0^t \exp[-K_m K_{bmin} K_p(t - \tau)] \times \sup_{t \geq 0} \left| v_{ref}(t) \frac{\bar{K}_b - K_b(t)}{\bar{K}_b} \right| d\tau \leq \exp(-K_m K_{bmin} K_p t) |e(0)| + \sup_{t \geq 0} (v_{ref}(t)) \sup_{t \geq 0} \left| \frac{\bar{K}_b - K_b(t)}{\bar{K}_b} \right| \times \int_0^t \exp[-K_m K_{bmin} K_p(t - \tau)] d\tau = \exp(-K_m K_{bmin} K_p t) |e(0)| + \sup_{t \geq 0} (v_{ref}(t)) \sup_{t \geq 0} \left| \frac{\bar{K}_b - K_b(t)}{\bar{K}_b} \right| \times \frac{1 - \exp(-K_m K_{bmin} K_p t)}{K_m K_{bmin} K_p}, \quad (18)$$

que resulta no majorante (10).