



Aplicação de um sistema embarcado e filtragem de Kalman para estimação de volume e fluxo de reservatório hídrico

Ricardo Fujita,¹ Victor C. Rodrigues,² Guilherme B. da Silva,³
Daniel S. Batista,⁴ Francisco Granziera Jr⁵

Departamento de Engenharia Elétrica, Univ. Estadual de Londrina, Londrina, PR

Resumo. Este trabalho descreve um sistema estimador de volume e fluxo de água em um reservatório utilizando apenas medidas de nível obtidas por meio de um sensor capacitivo comercial. São apresentados neste artigo o esquema básico do *hardware* montado para o condicionamento e aquisição de dados do sensor. Neste sistema, os dados são lidos através de um conversor A/D de 12 bits presente em um microcontrolador ARM STM32F407, que então executa um estimador recursivo de estados conforme as medidas. Este leva em conta a dinâmica da perda de volume de água no reservatório estimando seu volume e fluxo instantâneos com uma exatidão superior àquela obtida com os dados puros do sensor. Assim, o sistema implementado pode ser utilizado para o monitoramento de reservatórios, além da detecção de possíveis vazamentos. **Palavras-chave:** Filtro de Kalman; Estimação de Volume; Estimação de Fluxo; Sistema Embarcado.

1 Introdução

No período de 2014 até 2016 o estado de São Paulo enfrentou uma grave crise hídrica [2]. A população de determinadas cidades enfrentou um grave racionamento de água, além do aumento considerável na tarifa imposta pelas companhias na tentativa de conter o consumo supérfluo. Por este motivo, a racionalização do uso da água passou a ser valorizada por uma questão de economia doméstica. As companhias de abastecimento geralmente cobram uma tarifa específica desde que o consumo fique abaixo de uma quantidade determinada, considerada aceitável para uma residência. Caso o consumo ultrapasse este limiar, o valor da tarifa aplicada ao metro cúbico (m^3) é aumentada significativamente.

O temor pelo racionamento fez com que as famílias e os condôminos aumentassem o volume de seus reservatórios. Este drama pelo qual a população do sudeste brasileiro foi

¹ricardo.fujita.br@ieee.org, ricardofujita1@gmail.com

²victorcroisfelt@ieee.org

³g.b.br@ieee.org

⁴daniel.s.batista@ieee.org

⁵granziera@uel.br

submetida é um fato já conhecido em outras regiões brasileiras, como a região nordeste. Nesta, a população já lida há décadas com a escassez deste recurso tão indispensável.

2 Propósito e Justificativa

O usuário do sistema público de abastecimento de água conta com um medidor de consumo que apresenta apenas o volume consumido. Por outro lado, o valor instantâneo nos reservatórios nunca é conhecido com exatidão. O sistema de boias tipicamente empregado indica apenas se o reservatório não está no máximo. Assim, não há um sistema atual capaz de identificar o valor da vazão instantânea em reservatórios, e, muito menos, um sistema que possibilite detectar vazamentos em um curto prazo de tempo.

Diante esta limitação dos sistemas atuais, este trabalho busca desenvolver uma forma de mensurar o volume de líquido de um reservatório, utilizando sensores capacitivos e comerciais, e estimar o fluxo por meio do processamento das leituras de nível do sensor e utilizando um estimador recursivo de Kalman. O diferencial deste método é o uso do estimador recursivo, que permite uma medida mais exata do volume instantâneo bem como a taxa de enchimento ou esvaziamento, permitindo a detecção de possíveis vazamentos.

3 Metodologia e Procedimento Experimental

O procedimento experimental proposto neste trabalho consistiu em utilizar somente um sensor de nível capacitivo para obter o fluxo e o volume de água em um reservatório. O sensor utilizado foi o medidor de nível BTM1000, da fabricante Batelco, apresentado na subseção seguinte, em conjunto com um circuito eletrônico desenvolvido para aquisição e condicionamento do seu sinal.

Todavia, a aquisição do nível de água diretamente pelos dados do sensor possuem incertezas consideráveis, seja devido a ruídos, interferências, ou mesmo erros no processo de medição. Estes últimos são causados tanto pelo circuito de condicionamento como pelo funcionamento físico do transdutor. Realizando a modelagem do reservatório e do nível de água, pretende-se aplicar um método de estimação, por filtragem de Kalman, que melhore a exatidão e precisão do sistema de medição de nível desenvolvido [1, 3, 5].

3.1 Sensor e Sistema de Aquisição de Dados

O sensor capacitivo BTM1000 utiliza a condutividade da água como face condutora de um capacitor [4]. Este sensor analógico varia sua resistência conforme mudanças no nível de água de um determinado reservatório. A aplicação deste sensor visa o uso em um mostrador tipo VDO padrão da indústria. As características deste sensor estão expostas na Tabela 1. É possível realizar um ajuste fino para os limites das resistências equivalentes para os cenários de cheio e vazio. Nota-se que a altura mínima é nula para o reservatório vazio, como referência.

Dado o objetivo de implementar o medidor de nível em um sistema microcontrolado, foi necessário condicionar a saída resistiva do sensor para uma tensão compatível o conversor

Tabela 1: Especificações do sensor BTM1000 da Batelco empregado no protótipo.

Alimentação (V)	Consumo (mA)	Resistência quando cheio (Ω)	Resistência quando vazio (Ω)	Altura Máxima (m)
12	32	240	33	0,7595

A/D utilizado, neste caso, tensão de entrada entre $0 \sim 3,0 \text{ V}$ com 12 bits de resolução. O circuito elétrico construído e implementado no protótipo é descrito na Figura 1. A função deste circuito é ajustar o *offset* de tensão e a escala da medida de forma a otimizar o uso da faixa de tensão disponível no conversor A/D. Este circuito utiliza apenas um circuito integrado e alguns resistores de precisão, além de uma fonte simétrica de $\pm 12 \text{ V}$.

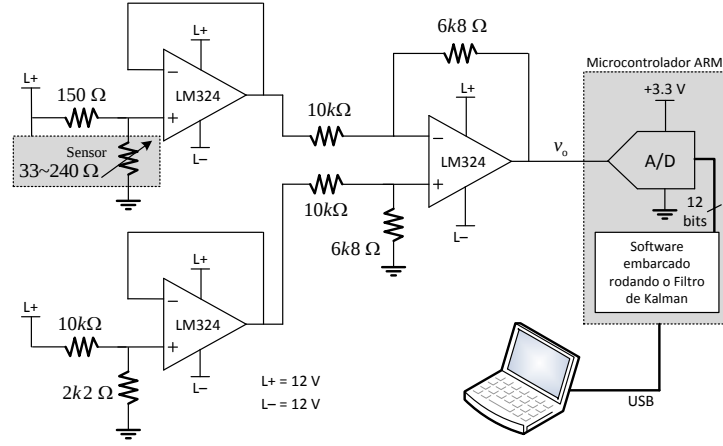


Figura 1: Diagrama elétrico simplificado para aquisição dos dados do sensor BTM1000.

Para o condicionamento da Figura 1, a relação aproximada entre a altura (h), medida pelo sensor, e a tensão de saída (v), após o condicionamento e já considerando o ajuste fino na calibração do sensor, é descrita pela equação (1).

$$h = \alpha v + \beta = -0,2532v + 0,7595 \text{ (m)}, \quad (1)$$

onde α é o coeficiente linear dependente da altura máxima e da tensão máxima de saída do circuito e β é o nível máximo de líquido no reservatório.

3.1.1 Incertezas no Processo de Aquisição de Dados do Sensor

Para modelar o filtro de Kalman, faz-se necessário verificar a incerteza da leitura devido ao ruído presente nas medidas. A Figura 2a mostra as medidas realizadas pelo conversor A/D, convertidas para altura e posteriormente para litros, considerando a métrica de reservatório de área de base de 1 m^3 . Para uma taxa de aquisição de 10 Hz a incerteza da medida, isto é, o desvio padrão, foi de $\pm 3 \text{ mm}$, equivalente a $\pm 3 \text{ L}$.

Derivando-se a informação de volume, obteve-se o gráfico da Fig. 2b, que mostra a medida da vazão sujeita ao ruído na medida do nível. As variações bruscas do gráfico,

causadas pelo ruído, impossibilitam determinar com exatidão a vazão do reservatório. Tais incertezas justificam a aplicação de um método matemático para suavizar as medidas em tempo de leitura, ou seja, um método recursivo que filtre os dados e estime o fluxo, minimizando a interferência do ruído. O filtro de Kalman é uma das alternativas em tais problemas [1, 3, 5].

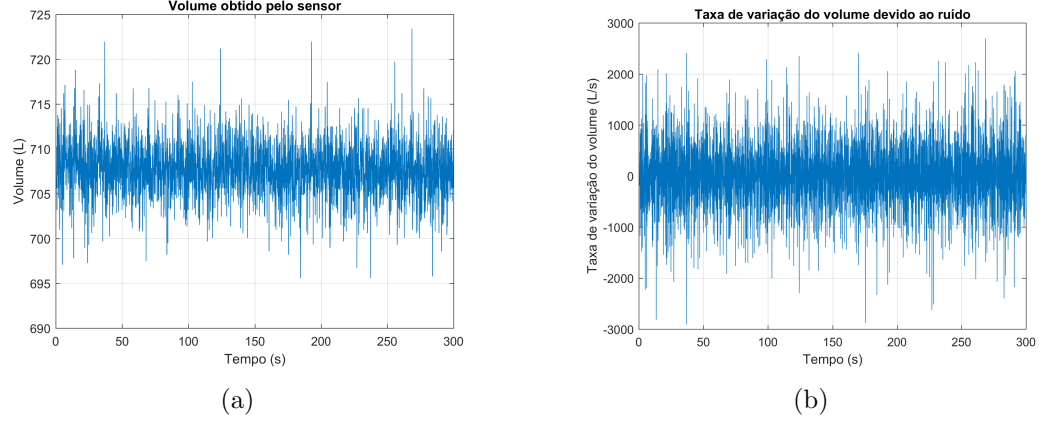


Figura 2: (a) Medidas do sensor em 10 Hz já convertidas em Litros, para o sistema em repouso. (b) Consequente taxa de variação do volume conforme as medidas de (a).

3.2 Modelagem do Sistema e do filtro de Kalman

Para a aplicação do filtro de Kalman no problema, conforme os equacionamentos em [6], considerou-se um vetor com o volume V do reservatório, em litros, e um fluxo f , dado em litros por segundos. Estas duas variáveis compõem o vetor de estados do sistema. Como f é a taxa de variação instantânea do volume do reservatório, chega-se na equação (2).

$$f = \dot{V} = \frac{dV}{dt} = A \frac{dh}{dt}, \quad (2)$$

onde h é a altura do nível de água no reservatório e A a área de secção do reservatório, constante para o sistema adotado. Assim, vetor de estados é dado pela equação (3), e o sistema em espaço de estados pelas equações (4) e (5).

$$\mathbf{x} = [V \ f]^T \quad (3)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V} \\ \dot{f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ f \end{bmatrix} \quad (5)$$

Considerando o intervalo de amostragem Δt e sua integração pequenos o suficiente, pode-se considerar df/dt nula, isto é, o fluxo é constante. Assim, a matriz de propagação de estados do Kalman pode ser escrita conforme a equação (6).

$$\Phi = e^{\mathbf{A}\Delta t} = \mathbf{I} + \mathbf{A}\Delta t = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

A medida coletada do sensor de nível do reservatório se relaciona com a informação de volume através da equação (7), onde $\mathbf{y}$ é igual a altura h medida pelo sensor em metros. Tem-se ainda que $\mathbf{H} = [\frac{1}{A} \ 0]$, onde A é a área de secção do reservatório.

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} \quad (7)$$

3.2.1 Propagação do Estado e Covariância

O estado do sistema e sua matriz de covariância podem ser propagados no tempo através das equações (8) e (9), respectivamente. Nesta última, a matriz $\mathbf{Q}$ abrange os erros de processo, associados ao modelo adotado, especialmente devido à hipótese de que f é constante.

$$\mathbf{x}_k^- = \Phi \mathbf{x}_{k-1}^+ \quad (8)$$

$$\mathbf{P}_k^- = \Phi \mathbf{P}_{k-1}^+ \Phi^T + \mathbf{Q} \quad (9)$$

3.2.2 Estimação do Estado e Covariância

O ganho de Kalman pode ser calculado através da equação (10), enquanto que as equações (11) e (12) utilizam um novo dado de volume do sensor para atualizar os valores do estado e suas covariâncias associadas, respectivamente. A matriz $\mathbf{R}$ contém a respectiva variância da medida do sensor utilizado.

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (10)$$

$$\mathbf{x}_k^+ = \mathbf{x}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{y}_k - \mathbf{H} \mathbf{x}_k^-) \quad (11)$$

$$\mathbf{P}_k^+ = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) \mathbf{P}_k^- \quad (12)$$

3.3 Ensaios e Coleta de Dados

Para os testes apresentados na sequência, foi utilizado um reservatório cilíndrico constituído de PVC com altura de $(759,5 \pm 0,5)$ mm, diâmetro de $(96,76 \pm 0,05)$ mm e área de (7353 ± 5) mm². Todavia, é essencial salientar que o modelo descrito para o filtro de Kalman é aplicável para qualquer tipo de reservatório, desde que o mesmo seja matematicamente modelável. Este reservatório possuía um orifício para a inserção de água, e uma saída com torneira na base para o escoamento do líquido. O sensor de nível BTM1000 foi então instalado no interior do reservatório.

Para analisar a resposta dinâmica do filtro, manteve-se o reservatório inicialmente com um volume de aproximadamente 4,3 L de água. na sequência, a torneira foi aberta de forma a escoar suavemente uma quantidade de 500 mL, voltando então a fechá-la.

O monitoramento dos dados da estimação bem como das variáveis do filtro de Kalman foi feito através do *software* STM-Studio, capaz de capturar em tempo real as variáveis do microcontrolador ARM STM32F407. Os dados foram lidos na mesma taxa de 10Hz de execução do *software* embarcado. Os dados obtidos foram exportados para o MATLAB e então analisados. A seção 4 apresenta tais resultados.

4 Resultados e Discussões

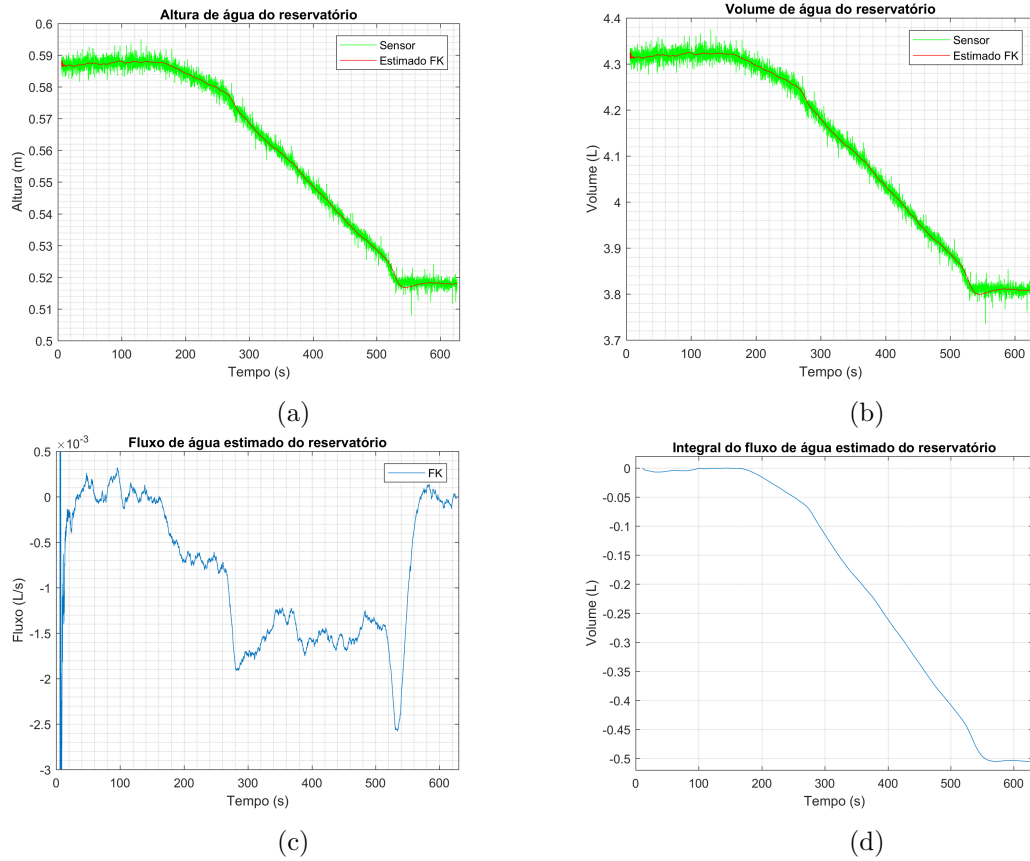


Figura 3: Dados obtidos no ensaio de esvaziamento do reservatório.

Pelas Figuras 3a e 3b observa-se que os dados de altura e volume processados pelo filtro foram muito menos ruidosos do que o sinal puro coletado pelo sensor que apresenta muitas oscilações bruscas, o que comprometeria a estimação de vazão.

Além disso, através do filtro de Kalman, pôde-se estimar o fluxo do reservatório (Fig. 3c). Realizando uma integração por retângulos dos dados de fluxo, obteve-se o gráfico da Fig. 3d. Neste, observa-se a perda de volume de $-0,5$ L, que condiz com o escoamento de 500 mL realizado no ensaio. Observa-se também que os gráficos das Figuras 3b e 3d estão em concordância, e praticamente se sobrepõem. O que valida o fluxo estimado pelo filtro.

Finalmente, analisando-se os valores de covariâncias do filtro de Kalman, encontrou-se que após um tempo de aproximadamente 30 s, a estimativa do filtro se estabilizou com um erro de ± 4 mL para o volume, e $\pm 0,4$ mL/s para o fluxo. O que corresponde a $\pm 0,544$ mm e $0,0544$ mm/s para o erro em altura e sua taxa de variação, visto que a área era de 7353 mm^2 . Para um reservatório hipotético de 1 m^2 de secção, este erro seria de $54,4$ mL/s, o que ainda é um valor razoável para a detecção da vazão. Lembrando que é possível diminuir ainda mais estes erros elevando-se a taxa de amostragem do sensor. Isto prova o funcionamento do sistema projetado para o problema inicial de monitorar o volume de água no reservatório, e principalmente, detectar possíveis vazamentos em curto prazo, mesmo que estes não sejam facilmente perceptíveis por serem pequenos.

5 Conclusões

Como visto, o sistema projetado permite não só o monitoramento do volume de água em um reservatório, mas também a obtenção do consumo atual através da estimativa de fluxo obtida pela filtragem de Kalman. Como o sistema é constituído basicamente pelo sensor de nível e de um sistema embarcado simples, este protótipo é de baixo custo e fácil instalação. E seu desempenho é limitado apenas à sensibilidade do sensor e à taxa de aquisição de dados do microprocessador. O protótipo pode ser também aplicado à área de IoT (*Internet of Things*) pois, interfaceando o sistema com aplicativos de *tablets* ou *smartphones*, torna-se possível monitorar e levantar estatísticas acerca do consumo de água em prédios, condomínios, residências, etc.. Possibilitando também a detecção de consumos anômalos, sem a espera até o fim do mês pela tarifa de água da concessionária. Que é quando normalmente se descobre, ou se desconfia, da existência de um vazamento.

Referências

- [1] BAR-SHALOM, Yaakov, and LI, Xiao-Rong. "Estimation and tracking- Principles, techniques, and software." Norwood, MA: Artech House, Inc, 1993. (1993).
- [2] CORTES, Pedro Luiz et al. Crise de abastecimento de água em São Paulo e falta de planejamento estratégico. *Estud. av.*, São Paulo, v.29, n.84, p.7-26, Aug. (2015).
- [3] EINICKE, G. A. Smoothing, Filtering and Prediction: Estimating the Past, Present and Future. Rijeka, Croatia: Intech. ISBN 978-953-307-752-9, 2012.
- [4] LOIZOU, K. et al. A low-cost capacitive sensor for water level monitoring in large-scale storage tanks. 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). 1416-1421, (2015), DOI: 10.1109/ICIT.2015.7125295.
- [5] MALATHI, R and KRISHNAN, J. Recent Advancements in System Modelling Applications. Chapter 2, 508 p. Springer, India, (2013), DOI: 10.1007/978-81-322-1035-1_2.
- [6] SIMON, D. Optimal State Estimation: Kalman, H-Infinity, and Nonlinear Approaches. Chapter 5, 1st ed., Wiley-Interscience, (2006).