



O CONTROLO DO ESCOAMENTO BIFÁSICO PARA A EFICIÊNCIA DE SISTEMAS ELEVATÓRIOS

Elias Tasca¹, Nelson Carriço², Helena M. Ramos³

¹Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas 13083-889, Brasil

²Instituto Politécnico de Setúbal/Escola Superior de Tecnologia do Barreiro, Rua Américo da Silva Marinho, 2839-001 Lavradio, Portugal

³Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico, CERIS, Avenida Rovisco Pais 1, 1049-001 Lisboa, Portugal
¹elias.tasca@gmail.com

RESUMO

O presente trabalho ressalta a importância do adequado gerenciamento do ar em linhas adutoras para garantir seu funcionamento eficiente, confiável e seguro. O equacionamento simplificado para a capacidade hidráulica de um sistema adutor com ar aprisionado é apresentado. Na sequência, dois exemplos numéricos são explorados: no primeiro, a influência da altura do ponto alto com bolsão de ar de uma linha (e consequentemente a pressão sobre tal ponto) e da inclinação do respectivo tubo descendente na capacidade hidráulica do sistema é analisada; o segundo exemplo analisa quais os efeitos esperados para uma linha elevatória quando a válvula de ar de seu ponto alto torna-se inativa. Por fim, o artigo analisa a evolução temporal de ondas de pressão no contexto do transitório hidráulico gerado pelo desligamento repentino do sistema de bombeamento de uma linha elevatória com válvula de ar instalada em um ponto alto distinto.

Palavras-Chave

Adução de água, Bolsão de ar, Eficiência energética

1. INTRODUÇÃO

A presença de ar aprisionado em sistemas adutores é uma situação frequente e que muitas vezes contribui significativamente para o aumento dos custos energéticos [1]. Estratégias inicialmente robustas para o controlo de ar podem se tornar ineficazes se não forem adequadamente ajustadas a novas condições operacionais [2]. Duas estratégias que se destacam para o controlo de ar em sistemas adutores são o estabelecimento de velocidades mínimas de escoamento que permitam a remoção hidráulica do ar de trechos descendentes e a aplicação de válvulas de ar [3]. O aprisionamento de ar pode ocorrer por diversos motivos: enchimento incompleto; drenagem; liberação de ar da fase líquida; intrusão de ar por meio de entradas/saídas, juntas mal vedadas, ou válvulas de ar durante eventos caracterizados por pressões negativas [4]. O ar aprisionado, por sua vez, pode resultar em diversos efeitos: redução da celeridade de ondas de pressão; aumento da complexidade de transitórios

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

hidráulicos; perdas de carga adicionais com conseqüente aumento de custos energéticos; intensificação de vibração e conseqüente escoamento ruidoso; ocorrência de água esbranquiçada; corrosão mais acelerada de tubos metálicos; possível entrada de contaminantes através de válvulas de ar desajustadas [4].

O objetivo do presente trabalho consiste em analisar o crescimento ou redução de bolsas de ar em resposta a mudanças nas condições operacionais de um sistema adutor considerando a influência da velocidade crítica para remoção hidráulica do ar e o funcionamento de válvulas de ar.

2. METODOLOGIA

Um problema evidente resultante da presença de um bolsão de ar aprisionado em um ponto alto de uma linha de adução é a redução da seção disponível para o escoamento de água. Nesse sentido e assumindo que o bolsão tem comprimento desprezível, teríamos uma situação análoga àquela com válvula semiaberta, ou seja, o bolsão geraria perda de carga localizada pelo estreitamento pontual do escoamento. Com isso em vista, a carga hidráulica na seção de montante da linha para se estabelecer uma vazão Q seria dada por

$$H = H_g + KQ^2 + WQ^2 \quad (1)$$

em que H_g é a diferença de nível entre os reservatórios, K é o coeficiente de perda de carga relativo ao somatório das perdas de carga localizadas típicas do circuito hidráulico, e W é o coeficiente de perda de carga localizada devido ao bolsão de ar.

Para um sistema elevatório, tal carga hidráulica na seção de montante seria oferecida pelo seu sistema de bombeamento com intensidade governada por

$$H = aQ^2 + cR^2 \quad (2)$$

em que a e c são coeficientes típicos de uma turbo-máquina (ou sistema de bombeamento), e R é sua velocidade específica dada por N_2/N_1 em que N_2 é a velocidade de rotação atual e N_1 é a rotação nas condições normais.

De forma geral, para linhas longas, a não ser no que se refere a válvulas de controle de vazão, perdas de carga localizadas (devido a curvas, expansões, entradas e saídas de reservatórios, por exemplo) são frequentemente de menor relevância no cômputo da perda de carga total em comparação com as perdas por atrito.

Para linhas longas, deve-se atentar para locais onde grandes bolsões de ar possam se acumular de maneira crônica com eventual formação de escoamento em canal sob eles. Trechos suscetíveis para o aprisionamento de grandes bolsões de ar são aqueles descendentes com grande declividade sem a instalação de válvula de ar (ou com válvula em mau funcionamento) no ponto alto/mudança de declividade correspondente.

Para entender o comportamento de um bolsão de ar aprisionado em um sistema pressurizado, pode-se tomar mão da equação de transformação politrópica dada por

$$P_a V_a^k = C^* \quad (3)$$

em que P_a é a pressão no bolsão de ar, V_a é seu volume, k é o expoente politrópico, e C^* é a constante da transformação politrópica considerando variação de volume.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Para simplificar a análise do escoamento em canal sob um grande bolsão de ar, pode-se invocar a hipótese simplificadora de que o nível de água no escoamento em canal é muito menor do que o diâmetro da tubulação [1]. Considerando tal hipótese, a equação politrópica pode ser reescrita como

$$P_a L_a^k = C \quad (4)$$

em que L_a é o comprimento do bolsão ao longo do tubo, e C é a constante de transformação politrópica considerando variação de comprimento. Desse modo, podemos concluir que

$$L_a = \left(\frac{C}{P_a}\right)^{1/k} \quad (5)$$

Para o escoamento em canal no tubo pressurizado, a perda de carga gerada pelo bolsão de ar no trecho descendente pode ser obtida por

$$h_a = \sin\theta L_a \quad (6)$$

em que θ é a inclinação do tubo descendente com ar aprisionado [1].

Para uma linha de adução partindo de um reservatório 1 (nível da água em Z_1) até um reservatório 2 (nível da água em Z_2), considerando a formulação de perda de carga por atrito segundo Darcy-Weisbach, temos que

$$Z_1 - Z_2 + \left(a - f \frac{(L-L_a)}{D} \frac{1}{2gA^2}\right) Q^2 + cR^2 - \sin\theta L_a(C, Q) = 0 \quad (7)$$

em que f é o fator de atrito, L é o comprimento total da adutora, D é seu diâmetro, g é a aceleração devido à ação da gravidade, e A é a área da seção transversal do tubo [2]. A pressão no bolsão de ar P_a , necessária para computar o valor de L_a na Equação (7), é dada por

$$P_a = \left(aQ^2 + cR^2 + Z_1 - Z_S - f \frac{L_{1-S}}{D} \frac{Q^2}{2gA^2}\right) \gamma + P_{\text{atm}} \quad (8)$$

em que Z_S é a elevação do ponto alto com válvula de ar, L_{1-S} é a distância entre a seção de montante e a válvula de ar, γ é o peso específico da água, e P_{atm} é a pressão atmosférica [2].

3. O EFEITO DO AR NA OPERAÇÃO NORMAL

Para que uma bolsa de ar aprisionada se mova para jusante num trecho descendente, a velocidade da água deve exceder um certo valor crítico v_c . Existem diversos trabalhos de investigação disponíveis na literatura a esse respeito [2]. No Quadro 1, mostram-se os resultados de v_c para diferentes inclinações com base no trabalho de [5]. Como indicado no Quadro 1, a medida em que aumentamos a declividade ou o diâmetro de um trecho, v_c também aumenta. O conhecimento desses valores de v_c pode permitir evitar problemas associados a bolsas de ar dentro de condutas.

Para o enchimento de condutas, o manual M51 da AWWA recomenda velocidades baixas, inferiores a 0.3 m/s, para evitar eventuais picos de pressão excessivos [3]. No entanto, conforme observado no Quadro 1, para uma conduta horizontal, com um diâmetro modesto de 300 mm, por exemplo, o valor de v_c corresponde a 4 vezes esse valor limite de 0.3 m/s. Vale ressaltar que o diâmetro de uma conduta é tipicamente selecionado considerando um caudal a ser alcançado no horizonte de projeto com valores superiores aos iniciais. Assim, a ausência de locais suficientes com ventilação pode provocar a retenção de ar na linha.

SMART WATER:

Transição hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Quadro 1. Velocidade crítica v_c em m/s de acordo com a equação segundo Escaramela (2007) [5] com $0.30 \leq n < 2.0$

Diâmetro do tubo (mm)	Inclinação do trecho de tubo descendente						
	0°	4°	8°	12°	16°	20°	24°
150	0.8	1.0	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3
200	0.9	1.2	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5
300	1.2	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.8
500	1.5	1.8	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4
750	1.8	2.3	2.4	2.6	2.7	2.8	2.9
1000	2.1	2.6	2.8	3.0	3.1	3.2	3.3

A Figura 1 será usada para exemplificar o efeito de um bolsão de ar em um ponto alto de uma linha adutora por gravidade (exemplo retirado de [2]). O caso referente a uma adutora elevatória será tratado na sequência com base na Figura 2 (também retirada de [2]). Nas Figuras 1 e 2, o bolsão de ar é considerado estacionário na parte de montante do segmento descendente L_3 . A Figura 1 considera os seguintes dados: $L = 2000$ m, $L_1 = 500$ m, $L_2 = 500$ m, $L_3 = 500$ m, $L_4 = 500$ m, $f = 0.017$, $D = 0.5$ m, $C = L_a^k P_a = 2000^{1.2} 101325$, $Z_5 = 40$ m. Perdas de carga localizadas são desprezadas. Como evidenciado pelo valor constante de C , na Figura 1, considera-se uma mesma massa de ar para os dois casos avaliados.

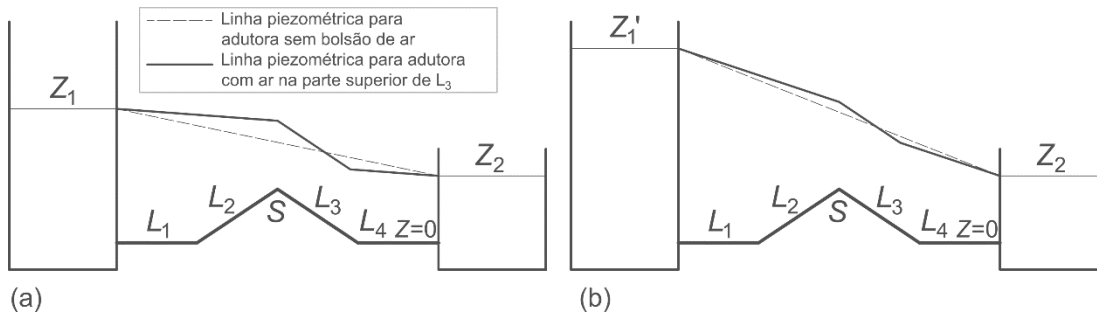


Figura 1. Conduto com bolsa de ar a montante de trecho descendente com $Z_2 = 50$ m: (a) reservatório de montante com $Z_1 = 100$ m; (b) linha com maior vazão com reservatório de montante com $Z_1' = 145$ m—de Tasca et al. (2023) [2].

Como observado na Figura 1, o impacto negativo do bolsão de ar é mais acentuado para o caso com $Z_1 = 100$ m do que para o caso com $Z_1 = 145$ m. De fato, o maior valor de L_a ocorre para o caso com $Z_1 = 100$ m. Note que, se baixarmos a altura do ponto alto, aumentaremos a pressão sobre o bolsão de ar, diminuindo assim seu volume. Além disso, para um Z_5 mais baixo na Figura 1, a declividade do trecho L_3 diminuiria. De fato, quanto maior a pressão sobre o bolsão de ar (devido a uma carga de montante maior ou a uma elevação menor do ponto alto) e quanto menor a declividade do trecho associado, menor o impacto negativo do bolsão na capacidade de adução da linha.

Para estudar com mais clareza a relevância da posição do ponto alto com bolsão de ar, consideremos agora o efeito da variação da altura do ponto alto de uma linha de recalque

SMART WATER:

Transição hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

conforme indicado na Figura 2. Esta figura considera os seguintes dados: $L = 2000$ m, $L_{1-S} = 1000$ m, $Z_1 = 0$ m, $Z_2 = 50$ m, $f = 0.017$, $D = 0.5$ m, $C = L_{a,atm}^{1.2} P_{atm} = 320^{1.2} 101325$. O sistema de bombeamento na Figura 2 consiste em 4 bombas do modelo KSB ETA 200-33 com rotor de 330 mm (duas bombas em série estão em paralelo com outras duas bombas em série). Além disso, $Q_{0,1}$ indica a vazão para o caso sem bolsão de ar e sem bombeamento considerando reservatório de montante com $Z_1 = 55$ m, H_p é a carga hidráulica no bolsão de ar, e $Z_{1,1} = 55$ m. Na elaboração da Figura 2, considerou-se a Equação (7).

Note que, para a menor rotação do sistema de bombeamento (77%) e para as maiores elevações do ponto alto (menores valores de H_p), a adutora perde quase que completamente sua capacidade de adução. Para a rotação de 98%, porém, a presença do bolsão de ar pouco afeta a capacidade da linha. Note também que tanto a perda de carga devido ao bolsão (h_a) quanto seu volume (representado por L_a) diminuem quando aumentamos H_p , ou seja, quando diminuimos a altura do ponto alto Z_S . De fato, na Figura 2, à medida que diminuimos Z_S , diminuimos a declividade do trecho descendente e conseqüentemente a perda de carga por causa do bolsão de ar.

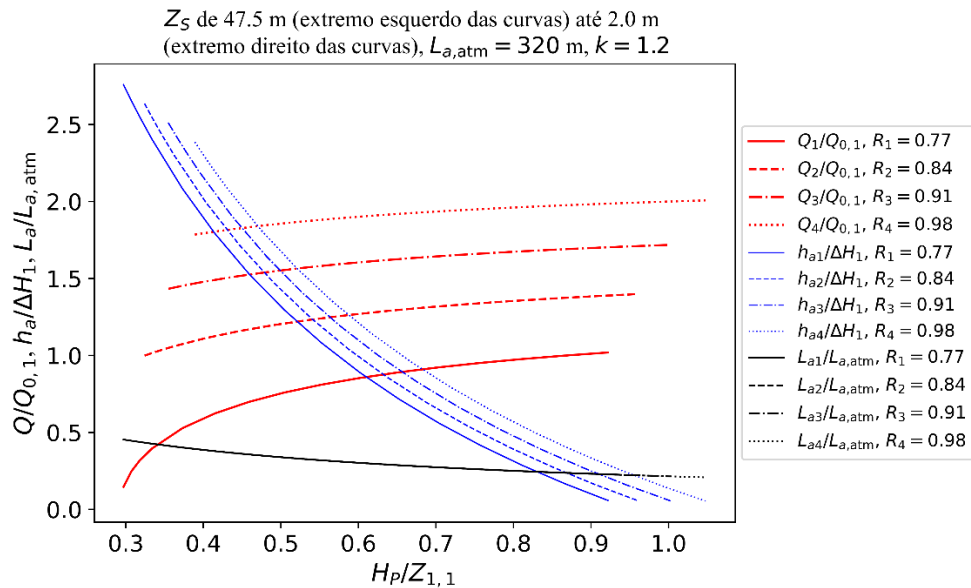


Figura 2. Influência de um bolsão de ar sobre a capacidade de adução de um sistema elevatório—de Tasca et al. (2023) [2].

Na sequência, exploramos a evolução de um bolsão de ar em uma linha elevatória com ponto alto distinto no contexto de mudanças em seu padrão de operação. A Figura 3 considera os seguintes dados: $L = 6000$ m, $L_{1-S} = 3000$ m, $f = 0.017$, $Z_1 = 0$ m, $Z_2 = 50$ m, $Z_S = 40$ m, $D = 0.5$ m, $\theta = 10^\circ$, $k = 1.0$, duas bombas em série do modelo KSB ETA 250-33 com rotor de 330/330 mm. Note na Figura 3 como a vazão crítica de 1452 m³/h (considerando $v_c = 2.1$ m/s) é bem maior do que a vazão para o ponto inicial 1 com velocidade de 1.6 m/s.

No ponto 1 da Figura 4, considera-se que o ponto alto conta com ventilação por uma válvula de ar em perfeito funcionamento. Desse modo, não há problema em termos o ponto 1 posicionado do lado esquerdo da linha vertical referente ao valor de Q_c , pois a válvula de ar se encarregara da expulsão de eventuais acumulações de ar. Para o ponto 2 com rotação reduzida do sistema de bombeamento, também não haveria problema com acumulação de ar

SMART WATER:

Transição hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

na hipótese de a válvula em funcionamento adequado. Porém, caso a válvula de ar seja desativada por qualquer motivo enquanto o sistema estiver funcionando no ponto 2, então começará a acumulação de ar no ponto alto da linha.

Para efeito de exemplo, o ponto 3 considera uma vazão igual a metade daquela no ponto 2. Nesse caso, teríamos no ponto 3 uma massa de ar no bolsão de 157 kg, $L_a = 144$ m, $P_a = 466$ kPa, e volume do bolsão de 28.4 m³. Se a rotação da bomba fosse então retornada de 90% para 100%, então o novo ponto de funcionamento do sistema seria o ponto 4, para o qual a pressão aumenta para 501 kPa e o volume do bolsão diminui para 26.4 m³. Se a válvula continuar inativa a partir ponto 4, podemos chegar ao ponto 5 (metade da vazão do ponto 4) com massa de ar no bolsão de 407 kg, $L_a = 262$ m, e $P_a = 665$ kPa.

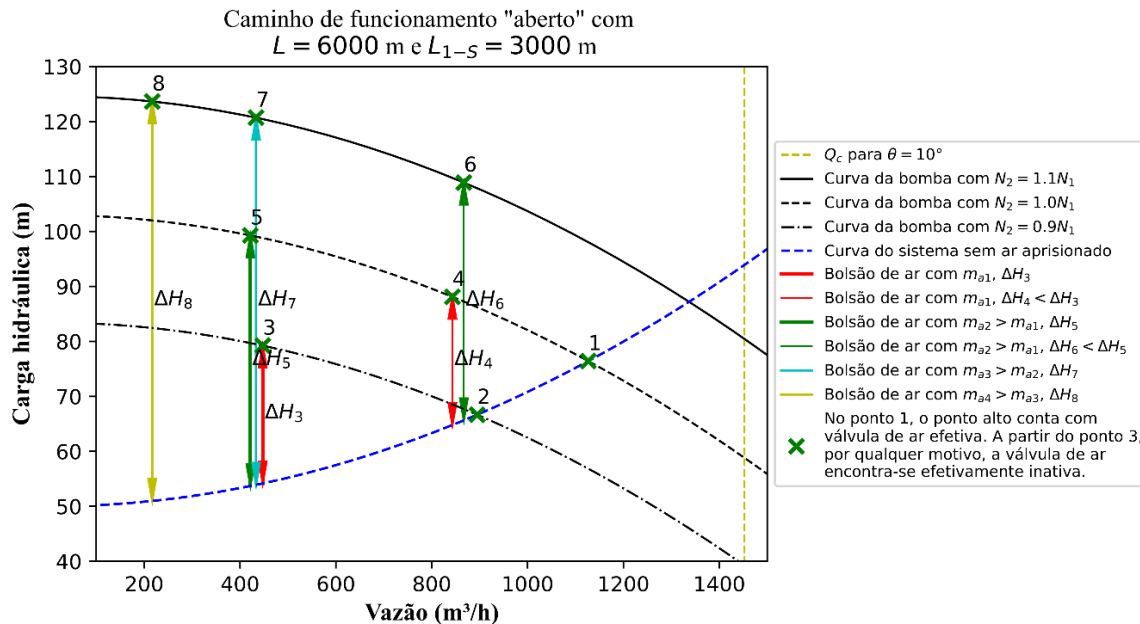


Figura 3. Circuito hidráulico com bomba de velocidade de rotação variável que conduz a uma situação de progressiva acumulação de ar caso a válvula de ar de seu ponto alto distintamente torne-se inativa.

4. TROCAS DE AR DURANTE TRANSITÓRIOS HIDRÁULICOS

Como mencionado, as válvulas de ar são os dispositivos responsáveis pelas trocas de ar em sistemas pressurizados. Os principais tipos de válvulas de ar são os seguintes: válvulas de liberação de ar (“air-release”) que libertam o ar aprisionado sob condições pressurizadas; válvulas anti-ar/vácuo (“air/vacuum”) que permitem trocas de ar em grandes quantidades, sob condições de baixos diferenciais de pressão durante o enchimento ou drenagem da conduta e eventos transitórios; válvulas de ar combinadas (“combination”) que desempenham as funções de liberação de ar e anti-ar/vácuo; válvulas quebra-vácuo (“vacuum breaker”) que admitem grandes quantidades de ar para proteger a conduta contra pressões sub-atmosféricas durante procedimentos de drenagem ou eventos transitórios.

A Figura 4 mostra a evolução temporal da cota hidráulica na seção de montante e no ponto alto com válvula de ar para uma linha de recalque submetida ao golpe de aríete proveniente do desligamento repentino de seu sistema de bombeamento. A Figura 4 considera os seguintes dados: $L = 6000$ m, $L_{1-5} = 3000$ m, $D = 0.5$ m, velocidade de escoamento no

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

regime permanente de 1.5 m/s, diferença de cotas entre os reservatórios de 50 m, válvula de ar na elevação de 35 m, orifício de entrada da ventosa de 100 mm e orifício de saída de 40 mm, sistema de bombeamento com duas bombas em série do tipo KSB ETA 250-33 com rotor de 330/330 mm, válvula de retenção na seção de montante que fecha imediatamente após o estabelecimento de velocidade negativa e que se mantém fechada até o fim do período de simulação. A simulação considera o modelo elástico, $c = 1000$ m/s, bolsão de ar localizado no ponto da válvula de ar, e transformação politrópica do bolsão de ar com $k = 1.4$.

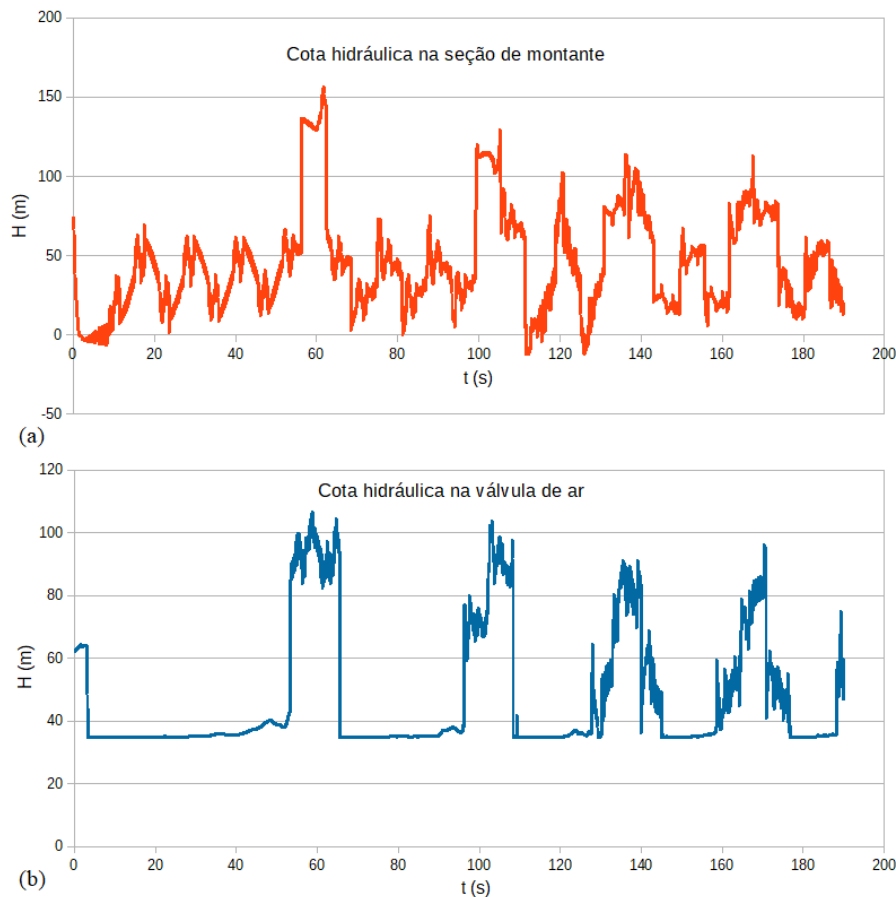


Figura 4. Paragem da bomba: (a) cota hidráulica na seção de montante da adutora; (b) cota hidráulica na válvula de ar locada em ponto alto distinto da linha.

O período teórico para uma adutora com $L = 6000$ m e $c = 1000$ m/s é de 12 s pela formulação $T = 2L/a$. Como observado na Figura 4, a pressão máxima no sistema ocorre na marca de 62 s (um tempo bem maior do que o período teórico). Na verdade, para o caso com uma válvula de ar ativa em ponto alto da linha, enquanto os membros da adutora estiverem hidráulicamente separados pela presença do bolsão de ar admitido pela ventosa, o período efetivo será menor do que 12 s. Nesse caso, para $L_{1-s} = 3000$ m, o valor do período para cada membro da linha é de 6 s.

Na Figura 4, note como a parada repentina do sistema de bombeamento gera a redução da cota hidráulica na seção de montante e depois na seção da válvula de ar. Como a válvula de ar tem tamanho de entrada relativamente grande, a pressão na válvula de ar na admissão se mantém próxima do valor atmosférico (cota hidráulica se mantém sempre próxima de 35 m).

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Através da Figura 4 é possível perceber um indício de relação causal entre o fechamento repentino da válvula de ar (caracterizado por um pico intenso de pressão) com a ocorrência de um pico de pressão na seção de montante da linha. O primeiro fechamento da válvula de ar ocorre na marca de 53 s. Subsequentemente, na marca de 56 s, ocorre uma subida abrupta da cota hidráulica na seção de montante. Note que a diferença de 3 segundos entre esses eventos é justamente o tempo que a onda de pressão demora para ir da válvula de ar até a seção de montante.

O pico de pressão na seção de montante (pico de pressão do sistema como um todo com cota hidráulica máxima de 157 m) ocorre na marca de 62 s. Porém, a válvula de ar volta a admitir ar na marca de 66 s. Novamente, quando há o fechamento abrupto da válvula de ar na marca de 96 s, há um surto de pressão na seção de montante na marca de 99 s. Esse padrão de comportamento das cotas hidráulicas continua se repetindo ao longo do tempo de simulação (a intensidade dos picos de pressão diminui enquanto a frequência das oscilações aumenta— isso é mais evidente nos primeiros ciclos do transitório).

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho ressalta a relevância do gerenciamento do ar em sistemas adutores para sua operação eficiente, confiável e segura. O efeito negativo do ar aprisionado é influenciado pelo tamanho e localização do bolsão de ar, inclinação do trecho descendente com ar, intensidade da carga hidráulica na seção de montante, e características da linha. A redução da capacidade de transporte devido ao ar aprisionado é especialmente problemática para sistemas que funcionam sob pressões relativamente baixas. A principal implicação do presente trabalho é que a diligência na operação e a consciencialização das considerações de controle e gestão do ar são uma necessidade contínua em sistemas de transporte de água que desempenham suas funções durante longos horizontes de projeto (que podem atingir 40 anos ou mais, embora para equipamentos hidromecânicos se recomende um máximo de 25 anos).

REFERÊNCIAS

- [1] L. Ramezani, B. Karney, A. Malekpour. “Encouraging effective air management in water pipelines: A critical review,” *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 142, no. 12, 2016, 04016055.
- [2] E. Tasca, M. Besharat, H. M. Ramos, E. Luvizotto Jr., B. Karney. “Contribution of air management to the energy efficiency of water pipelines,” *Sustainability*, vol. 15, no. 5, 2023, 3875.
- [3] AWWA (American Water Works Association). *Manual of water supply practices M51–Air valves: Air-release, air/vacuum and combination*, 2nda ed., Denver, CO: AWWA, 2016.
- [4] H. M. Ramos, V. S. Fuertes-Miquel, E. Tasca, O. E. Coronado-Hernández, M. Besharat, L. Zhou, B. Karney. “Concerning dynamic effects in pipe systems with two-phase flows: Pressure surges, cavitation, and ventilation,” *Water*, vol. 14, no. 15, 2022, 2376.
- [5] M. Escarameia. “Investigating hydraulic removal of air from water pipelines,” *Water management*, vol. 160, 2007, 25-34.