

I-143 - DESENVOLVIMENTO DE UMA ALTERNATIVA PARA SIMULAÇÃO DE TRANSIENTES HIDRÁULICOS

Emílio César Cavalcante Melo da Silva⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Mestre em Estruturas pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ). Doutor em Estruturas e Materiais pelo Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT).

Victor Leonardo Cavalcante Melo da Silva⁽²⁾

Engenheiro de Computação pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Mestrando em Engenharia de Computação na UFRN.

Valmir Melo da Silva⁽³⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Mestre em Recursos Hídricos pela UFRN. Engenheiro da Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN), aposentado. Professor de Engenharia Civil na UFRN, aposentado.

Endereço⁽¹⁾: Rua Vereador Amaro Magalhães, 721, Apt. 401 - Tirol - Natal - RN - CEP: 59014-580 - Brasil - Tel: +55 (84) 9993-2244 - e-mail: emiliosilva@gmail.com

RESUMO

A simulação de transientes hidráulicos é de grande importância para o projeto de adutoras de transporte de água e efluentes de sistemas de esgotos. Os autores desenvolveram um aplicativo para a simulação de transientes utilizando o método das características, com foco nos transientes de pressão causados por parada de bombas em trechos escoados por recalque e pelo fechamento de válvulas em trechos escoados por gravidade.

Comparado a aplicativos comerciais já existentes, a solução descrita neste trabalho adota uma abordagem mais didática e compreensível para a entrada de dados e realização de simulações, por ter sido desenvolvida com base na experiência e demandas dos autores durante o projeto de adutoras de água de grande extensão. Apesar de não ter a flexibilidade das alternativas comerciais, devido ao foco nos casos de uso específicos dos autores, foram obtidos bons resultados em diversos projetos reais. Estes projetos incluem múltiplos trechos de diferentes diâmetros e materiais, com um tronco principal formado por canalizações em série e derivações representadas pela sua vazão nominal.

Este trabalho registra as lições aprendidas durante o desenvolvimento do aplicativo, incluindo aspectos técnicos da simulação, como hipóteses e simplificações adotadas e aspectos de usabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Adutoras de Água, Transientes Hidráulicos, Golpe de Aríete, Características, Simulação.

INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta as soluções práticas adotadas para os desafios técnicos e de usabilidade encontrados durante o desenvolvimento de um aplicativo para simulação e análise de transientes hidráulicos em tubulações, utilizando o método das características. Os transientes hidráulicos, também denominados informalmente pelo termo “golpe de aríete”, são variações de pressão no interior dos dutos, tanto subpressões quanto sobrepressões, que se propagam pelo duto em forma de ondas, podendo gerar sérias consequências para o próprio duto e para os equipamentos. Estas variações são oriundas de alterações no fluxo de um fluido em dutos, devido à parada brusca das bombas ou ao fechamento repentino de válvulas, entre outras causas.

É de suma importância que o projetista possa avaliar a magnitude desse fenômeno em adutoras ou sistemas de recalque de fluidos, tomando medidas para a instalação dos dispositivos mais adequados visando atenuar os efeitos da compressão ou da decompressão dos fluidos nos dutos. O objetivo destas medidas é manter a curva piezométrica sempre acima da cota do terreno, para evitar a formação de vácuo, com separação da coluna líquida e posterior pico de pressão devido à reaproximação brusca da coluna.

Há diversas soluções comerciais para a simulação de transientes hidráulicos, por exemplo: AFT Impulse, ARTS, AQUIS, ATMOS, CTran (FCTH, 2012), EPA-Surge, Flowmaster, Flownex, Fluint, Hammer, HiTrans,

Hytran, InfoSurge, KYPipe, LIQT, Net-Pipe, Pipeline Studio, Wanda, WaterSums e WatHam (alguns dos quais são comparados por DUDLIK et al., 1998). Também estão disponíveis simuladores desenvolvidos no ambiente acadêmico (por exemplo, SANTOS e CASTRO, 2002; BARBOSA et al., 2006), com objetivos diversos. A justificativa para o desenvolvimento de um novo aplicativo é a inadequação destas soluções comerciais e acadêmicas ao fluxo de trabalho dos autores; o alto custo; complexidade na entrada de dados e com interação do usuário; e incertezas a respeito das hipóteses de cálculo e interpretação dos resultados das simulações. A interpretação torna-se mais difícil quando estes resultados se apresentam muito diferentes dos resultados esperados pela intuição e por métodos aproximados de estimativa de transientes hidráulicos (por exemplo, os métodos expostos em PARMAKIAN, 1970).

Para identificação dos desafios referentes à usabilidade do aplicativo, foram pesquisados e analisados vários simuladores presentes no mercado. Constatou-se que, na maioria dos casos, os mesmos são demasiadamente complexos e/ou se encontram atrelados a pacotes mais completos, que não fazem parte do fluxo de trabalho dos autores. Não se encontrou um aplicativo voltado para a simulação de transientes em projetos simples de sistemas adutores ou de emissários de efluentes. Com base nesta análise e na experiência e fluxo de trabalho dos autores, foram enumerados os princípios desejados para um novo aplicativo.

A implementação destes princípios foi feita dividindo-se o problema em duas partes: (i) um simulador numérico, implementado na forma de uma biblioteca e (ii) um módulo de entrada de dados e exibição de resultados, utilizando esta biblioteca. Desta forma, foi possível dividir o desenvolvimento do aplicativo em duas frentes bastante independentes.

O simulador numérico adotou uma modelagem matemática baseada no *método das características* (STREETER e WYLIE, 1978; CHAUDHRY, 1987; ROSICH, 1987), visando não somente atender às recomendações da norma brasileira NBR 12215:1991 sobre o assunto (ABNT, 1991), mas sobretudo por se tratar de teoria de comprovada eficácia para as simulações (RIGHETTO, 1972; CAMARGO, 1991).

Diversos desafios foram encontrados durante a implementação desta modelagem e sua aplicação em adutoras de grande comprimento, conforme discutido na seção correspondente. Priorizou-se que o simulador pudesse atender aos casos práticos mais comuns, sem introduzir complexidade excessiva para o usuário.

O módulo de entrada de dados foi projetado de acordo com a rotina de trabalho típico de um projetista de adutoras, o que consideramos ser o principal diferencial da abordagem descrita neste trabalho, como discutido na seção referente à usabilidade. A exibição de resultados inclui gráficos das envoltórias de pressão observadas, além de relatórios contendo os dados de entrada para verificação e tabelas com os resultados numéricos da simulação. Através dos gráficos gerados podem ser identificados os pontos dos dutos onde os efeitos dos transientes, na forma de sobrepressões ou subpressões, precisam ser controlados com a instalação de dispositivos adequados.

Nas seções a seguir, será feito um breve resumo do método das características, a seguir serão discutidos os desafios encontrados no desenvolvimento dos módulos do aplicativo.

Os autores desenvolveram este trabalho independentemente de suas afiliações profissionais. Este trabalho foi financiado com recursos próprios.

MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS

Quando ocorrem os desligamentos bruscos das bombas, por falta de energia ou outro motivo, ou quando ocorre o fechamento repentino de uma válvula instalada nos dutos, variações de vazão e pressão se processam, sendo o fluido submetido a uma onda de compressão que se acumula em determinados pontos das linhas de adução (ou de descompressão devido à rarefação), gerando um aumento (ou redução) de pressão. A intensidade da variação da pressão depende das condições de deformação do material dos dutos, sendo menor para canalizações com módulo de elasticidade menores, como o PVC ou produtos similares.

Conforme CHAUDHRY (1987), as equações que regem o escoamento forçado em dutos são a equação do momento (1) e a equação da continuidade (2).

A equação do momento (1) descreve a aceleração do fluido por um gradiente de pressão:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -gA \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{f}{2DA} Q|Q| \quad \text{equação (1)}$$

onde Q é a vazão, t é o tempo, g é a aceleração da gravidade, A é a área do duto, H é a altura da linha piezométrica, f é o fator de fricção e D é o diâmetro do duto. Em regime permanente, $\partial Q / \partial t = 0$, sendo recuperada a equação usual da perda de carga $h = -\partial H / \partial x$ devido à fricção nas paredes do duto.

Quando há variações de vazão ao longo do duto, o fluido é comprimido devido à acumulação (ou descomprimido devido à rarefação), gerando um aumento (ou redução) de pressão. Isto se soma à deformação do próprio duto. A equação da continuidade (2) descreve esta variação de pressão:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} \quad \text{equação (2)}$$

onde a é a celeridade, ou a velocidade de propagação de uma onda de pressão no duto. A celeridade depende das propriedades do fluido e do material que compõe o duto, sendo dada pela equação (3):

$$a = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + KDC/eE}} \quad \text{equação (3)}$$

onde K é o módulo volumétrico do fluido, ρ é a densidade do mesmo, D é o diâmetro do duto, C é uma constante que depende das condições de ancoramento do duto, por exemplo $C = 0,91$ para um duto ancorado longitudinalmente em toda a sua extensão, e é a espessura do duto e E é o módulo de elasticidade do material do duto. Analisando a equação (3), observa-se que um duto de material rígido como ferro fundido terá uma celeridade maior que um duto de material mais flexível, como PVC.

As equações diferenciais parciais em x e t (1) e (2) podem ser consolidadas se considerarmos duas linhas características que obedecem as equações $x = x_0 \pm at$. Ao longo destas linhas, tem-se:

$$\frac{dQ}{dt} \pm \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad \text{equação (4)}$$

que é uma equação diferencial ordinária na variável t . Para um ponto P qualquer, cada uma das duas linhas características corresponde a uma equação da forma (4).

Utilizando as duas equações (com sinal positivo e negativo, respectivamente), é possível calcular Q e H no ponto P a partir dos valores conhecidos de Q e H nos pontos vizinhos O e Q em um instante anterior ($t - dt$). Esta estratégia de solução é denominada método das características. As linhas características OP e PQ estão ilustradas na Figura 1.

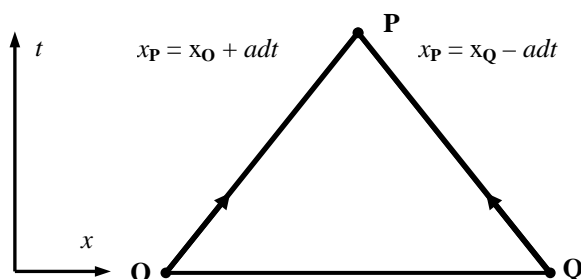


Figura 1. Linhas características para cálculo no ponto P.

A equação (4) permite prever a pressão e vazão em qualquer ponto desejado. A implementação do método das características consiste em (a) discretizar o duto em um número finito de nós, (b) discretizar o tempo em um número finito de passos, (c) utilizar o método das características para calcular a pressão e vazão em cada ponto

a partir dos valores obtidos no passo de tempo anterior e (d) aplicar condições de contorno ou compatibilidade nos pontos no contorno, derivações e mudanças de propriedades do tubo.

A discretização é feita dividindo-se um trecho de comprimento L em N intervalos de comprimento $\Delta x = L/N$. Isto define $N+1$ nós x_0, x_1, \dots, x_N , nos quais se deseja calcular a vazão Q_0 a Q_N e a altura piezométrica H_0 a H_N . Caso existam múltiplos trechos, cada trecho j de comprimento L^j pode ser dividido em N^j intervalos de comprimento Δx^j . Por simplicidade, será assumido um único trecho quando isto não afetar a discussão.

O passo de tempo Δt é a princípio arbitrário, contudo se for adotado o valor $\Delta t = \Delta x/a$, as linhas características irão coincidir com os nós da discretização do trecho, ou seja, se o nó **P** está em x_i e no tempo t , então as linhas características **OP** e **QP** irão iniciar nos pontos **O** em x_{i-1} e **Q** em x_{i+1} , ambos no tempo $t - \Delta t$.

Quando há múltiplos trechos, com valores diferentes de a , é necessário utilizar um valor comum para Δt para que seja possível atualizar as pressões e vazões em todo o duto simultaneamente. Neste caso, os pontos **O** e **Q** não coincidirão com os nós, como ilustrado nas Figuras 2 e 3.

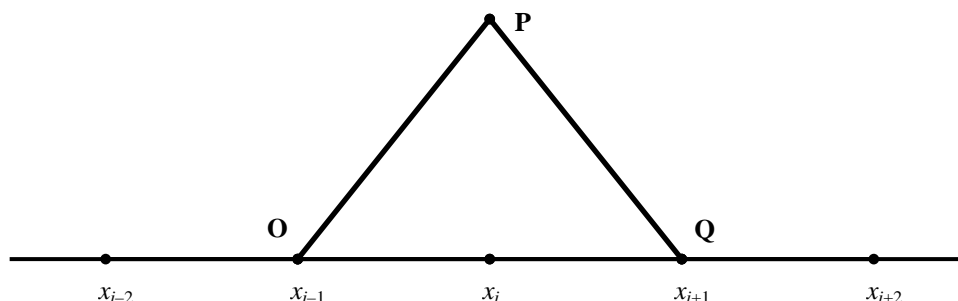


Figura 2. Linhas características para cálculo no ponto P quando $\Delta t = \Delta x/a$.

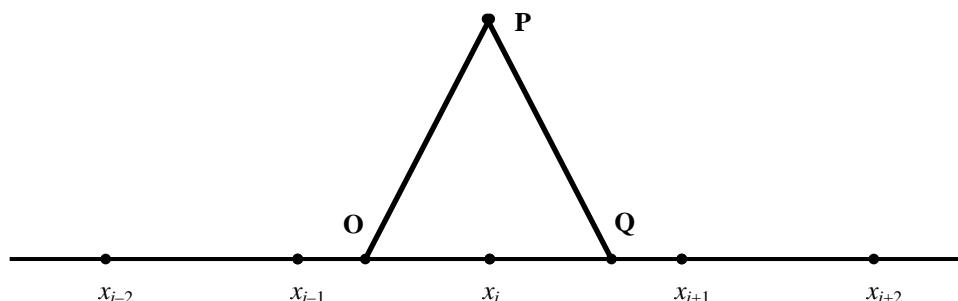


Figura 3. Linhas características para cálculo no ponto P quando $\Delta t < \Delta x/a$.

No caso ilustrado pela Figura 3 (ou no caso em que $\Delta t < \Delta x/a$), o valor das vazões Q_O e Q_Q , bem como das pressões H_O e H_Q , são calculadas por simples interpolação linear entre os valores nos nós.

Em qualquer dos casos, são conhecidos ou trivialmente calculáveis os valores de pressão e vazão em **O** e **Q**, no passo de tempo anterior.

Aproximando-se a equação (4) por diferenças finitas e multiplicando-se por Δt , tem-se as equações características discretizadas:

$$\begin{cases} Q_P - Q_O + S(H_P - H_O) + RQ_{OP} \Delta t = 0 \\ Q_P - Q_Q - S(H_P - H_Q) + RQ_{QP} \Delta t = 0 \end{cases} \quad \text{equação (5)}$$

onde $S = gA/a$ e $R = f\Delta t/2DA$. As vazões Q_{OP} e Q_{QP} são as vazões médias $Q_{OP} = (Q_P + Q_O)/2$ e $Q_{OQ} = (Q_P + Q_Q)/2$. Como primeira aproximação, pode-se tomar simplesmente $Q_{OP} = Q_O$ e $Q_{QP} = Q_Q$ e pode-se calcular $f(Q)$ utilizando este valor inicial. As equações a seguir assumem esta aproximação.

Explicitando-se a dependência entre Q_P e H_P nas equações (5), tem-se:

$$\begin{cases} Q_P = CP - SH_P \\ Q_P = CM + SH_P \end{cases} \quad \text{equação (6)}$$

onde

$$\begin{cases} CP = Q_O + SH_O - RQ_O|Q_O| \\ CM = Q_Q - SH_Q - RQ_Q|Q_Q| \end{cases} \quad \text{equação (7)}$$

Resolve-se o sistema linear de equações (6) para obter Q_P e H_P nos pontos internos do problema, obtendo-se as equações (8) e (9):

$$H_P = \frac{CM - CP}{2S} \quad \text{equação (8)}$$

$$Q_P = \frac{CM + CP}{2} \quad \text{equação (9)}$$

Em pontos de transição, os valores de S e R são diferente entre os dois trechos (anterior e posterior). Neste caso, o cálculo de CM e CP é feito usando os dados do trecho correspondente e a pressão é dada por:

$$H_P = \frac{CM - CP}{S_1 + S_2} \quad \text{equação (8a)}$$

e a vazão pode ser calculada por qualquer das equações (6) ou pela média:

$$Q_P = \frac{CM + CP}{2} + \frac{(S_2 - S_1)H_P}{2} \quad \text{equação (9a)}$$

Nota-se que as equações (8a) e (9a) são versões mais gerais de (8) e (9), sendo válidas em todos os casos.

Nos contornos e descontinuidades, é necessário utilizar uma condição adicional, uma vez que apenas uma das equações (6) existe nos pontos extremos.

(i) Reservatório

Em um reservatório, considera-se o nível constante $H_P = H_{res}$.

(ii) Tanque de alimentação unidirecional (TAU)

O tanque de alimentação unidirecional (TAU) possui uma válvula que abre ao atingir o nível mínimo H_{tau} . Inicialmente calcula-se H_P pela equação (9a). Caso $H_P \geq H_{tau}$, utiliza-se este valor e calcula-se a vazão normalmente por (8a).

Caso contrário, considera-se que a válvula abriu e tem-se $H_P = H_{tau}$. A vazão é calculada por (6a), obtendo-se dois valores distintos, correspondendo à vazão que chega ao tanque Q_{mont} e a vazão que sai do tanque Q_{jus} :

$$\begin{cases} Q_{mont} = CP - S_1 H_{tau} \\ Q_{jus} = CM + S_2 H_{tau} \end{cases} \quad \text{equação (6a)}$$

A diferença entre estes valores é a vazão fornecida pelo tanque unidirecional Q_{tau} , que pode ser integrada ao longo do tempo para estimar o volume fornecido pelo tanque (Eq. 11):

$$Q_{tau} = Q_{jus} - Q_{mont} \quad \text{equação (10)}$$

$$V_{tau} = \sum Q_{tau} \Delta t \quad \text{equação (11)}$$

(iii) Bomba centrífuga

Utiliza-se como condição adicional a equação da bomba (12):

$$H_P = \alpha^2 H_0 + \alpha B Q_P + C Q_P^2 \quad \text{equação (12)}$$

onde H_0 , B e C são constantes que descrevem a curva da bomba dada pelo fabricante e α é uma variável que decresce de 1 (condição de trabalho) para 0 (parada total) segundo a equação (13):

$$\alpha = \frac{1}{1 + K_b t} \quad \text{equação (13)}$$

onde K_b é uma constante de decaimento (dependente do momento de inércia, rotação e outras propriedades da bomba) e t é o tempo desde a parada.

A perda de carga localizada na linha de recalque $H_{loc} = K_s Q_P^2 / 2gA^2$ é sempre subtraída da curva da bomba.

(iv) Válvula de fechamento linear

Para válvulas, utiliza-se a equação da perda de carga localizada na válvula:

$$h_s = K_s \frac{Q_P^2}{2gA_{valv}^2} \quad \text{equação (14)}$$

onde h_s é a perda de carga e K_s é um coeficiente adimensional, considerado igual a 0,2 para uma válvulas de gaveta. Considerando um reservatório de nível H_{res} a jusante da válvula, $H_P = H_{res} + h_s$.

Considera-se que a área da válvula diminui linearmente com o tempo até o fechamento completo em $t = t_{fech}$, logo:

$$A_{valv} = \left(1 - \frac{t}{t_{fech}}\right) A \quad \text{equação (15)}$$

Combinando (14) e (15):

$$Q_P = \begin{cases} \sqrt{\frac{2g(H_P - H_{res})}{K_s}} \left(1 - \frac{t}{t_{fech}}\right) A, & t \leq t_{fech} \\ 0, & t = t_{fech} \end{cases} \quad \text{equação (16)}$$

(v) Derivação

Em uma derivação com vazão constante, tem-se ainda uma pressão única H_P para o ponto da derivação, mas há três vazões distintas, Q_{mont} à montante, Q_{jus} à jusante e Q_{deriv} na derivação. As equações (6a) devem ser empregadas, juntamente com a condição:

$$Q_{mont} = Q_{jus} + Q_{deriv} \quad \text{equação (17)}$$

para determinar o valor de H_P :

$$CP - S_1 H_P = CM + S_2 H_P + Q_{deriv}$$
$$H_P = \frac{CP - CM + Q_{deriv}}{S_1 + S_2} \quad \text{equação (18)}$$

e as vazões podem ser calculadas por (8a) como usual.

Um resultado mais realista é obtido assumindo $Q_{deriv} = K \sqrt{H_P - H_{deriv}}$, de forma a levar em conta a variação de vazão na derivação com a variação de pressão. A constante K é calculada de forma a respeitar a condição inicial do problema, e H_{deriv} é escolhida para representar a pressão à jusante da derivação.

DESAFIOS TÉCNICOS

A linguagem de programação selecionada para implementação do aplicativo foi a linguagem Python (Python Software Foundation, 2013). Esta linguagem possui diversas implementações de código aberto (por exemplo CPython, Jython e PyPy), que dão suporte a diversas plataformas, incluindo Windows, Mac OS X e Linux. A facilidade de escrever e alterar o código, juntamente com a ampla disponibilidade de bibliotecas de código aberto, foram os principais fatores para a seleção da linguagem. A principal desvantagem em se escrever a biblioteca de simulação em Python é o desempenho inferior de suas implementações, quando comparadas a uma linguagem de mais baixo nível, como C.

A implementação das equações da seção anterior é relativamente direta. A maior parte do esforço computacional está concentrado na implementação das equações (8) e (9), as quais são necessárias para calcular a vazão e pressão em cada ponto da tubulação no instante atual, dadas as pressões e vazões no instante anterior. Este cálculo foi implementado com o auxílio da biblioteca NumPy (OLIPHANT, 2013), a qual permite escrever equações envolvendo vetores (cujos elementos são as quantidades calculadas em cada ponto da tubulação) de forma simples e natural. Além da conveniência da notação, as operações com vetores são implementadas na linguagem C, reduzindo a desvantagem de desempenho inerente ao uso da linguagem Python. Foram consideradas como alternativas o uso da biblioteca numexpr (COOKE, 2013), a qual resulta em ganhos significativos de desempenho em relação a NumPy, ao custo de tornar o código menos direto e compreensível; e o uso da implementação PyPy (2013), a qual oferece uma execução mais rápida sem alterações no código, ao custo de limitações de compatibilidade (em particular, a compatibilidade com NumPy ainda está em desenvolvimento). Estas alternativas não foram utilizadas na implementação atual, mas são opções promissoras para o futuro, principalmente quando PyPy e NumPy se tornarem compatíveis. A implementação CPython (PSF, 2013) oferece ainda a possibilidade de transferir as partes mais críticas do código para extensões escritas em linguagem C, por exemplo com o auxílio do gerador de interfaces SWIG (2013).

Em uma tubulação uniforme, o método das características não requer obrigatoriamente a discretização, sendo possível calcular as pressões e vazões nas extremidades da tubulação sem o uso de pontos intermediários. Uma extensão desta ideia a redes complexas e ramificadas é o método das ondas características (WOOD, 2005; WOOD *et al.*, 2005), o qual é capaz de reproduzir os resultados do método das características em todos os nós. Decidiu-se não utilizar este método neste trabalho devido ao requerimento de desenho da envoltória de pressões, o qual naturalmente requer pontos intermediários para fornecer os dados necessários ao traçado, negando a principal vantagem deste método.

Um dos desafios encontrados foi a estratégia de discretização. O esforço computacional é aproximadamente linear em relação ao número de nós da discretização e em relação ao número de passos de tempo a simular. Como se utiliza a relação $\Delta t = \Delta x/a$, onde Δx é inversamente proporcional ao número de nós, ao manter constante o tempo simulado total, o número de passos de tempo se torna diretamente proporcional ao número de pontos. Ou seja, dobrar o número de nós da simulação também dobra o número de passos de tempo, quadruplicando o esforço computacional.

Para tubulações uniformes, pode-se empregar um número mínimo de nós para um traçado suave da envoltória de pressões. Contudo, em adutoras de múltiplos trechos, principalmente com materiais diferentes e portanto

celeridades diferentes, é necessário considerar a compatibilidade dos passos de tempo. Cada trecho i possui sua celeridade característica a_i , e o intervalo entre os nós deve idealmente atender:

$$\Delta t = \Delta x_i / a_i \quad \text{equação (19)}$$

O passo de tempo é necessariamente global, pois é necessário compatibilizar o cálculo em todas as interseções de trechos. O intervalo Δx_i é uma função do número de nós em que o trecho está dividido. Portanto, é necessário obter uma distribuição ótima do número de nós por trecho, de forma que a relação (19) seja aproximadamente atendida.

A estratégia adotada neste trabalho foi a de iniciar com o número desejado de pontos e distribuir dentre os trechos de forma que o Δt global aproxime-se ao Δt ideal de cada trecho. O tempo total da linha (o tempo necessário para um pulso de pressão se propagar de uma extremidade a outra) é calculado, e dividido pelo número de pontos, gerando uma estimativa para Δt . Em cada trecho, o comprimento Δx_i é calculado por (19) e o número de nós necessário é calculado e arredondado para um inteiro por $N = \text{round}(L_i / \Delta x_i)$. Há uma tolerância para o número total de pontos, e um algoritmo reduz ou aumenta este número de forma a reduzir a diferença entre o Δt global e o seu valor ideal para cada trecho.

Ao simular adutoras com trechos de PVC intercalados com trechos de ferro fundido, percebeu-se que o intervalo Δx nos trechos de ferro fundido (alta celeridade) é muito menor que nos trechos de PVC (baixa celeridade). Como consequência, adutoras muito heterogêneas requerem maior número de pontos para evitar má discretização dos trechos de baixa celeridade. Uma aproximação empregada sem perdas significativas foi o remanejamento de trechos curtos, de forma a consolidá-los, diminuir o número de transições de material e aumentar o comprimento médio dos trechos restantes. Este procedimento não foi automatizado, pois o projetista precisa aplicar seu julgamento caso a caso.

A consequência do uso de espaçamentos não ideais entre os nós é a necessidade de interpolar o valor da vazão e da pressão antes de seu uso na equação das características, como mostrado na Figura 3. Na prática, observa-se uma suavização progressiva de pulsos de pressão durante a propagação da onda, um fenômeno cumulativo de difusão numérica. Esta suavização somente pode ser contornada aumentando o número de nós da simulação. Por outro lado, se o intervalo de tempo é superior a $\Delta x_i / a_i$ o método torna-se instável (CHAUDHRY, 1987), logo esta condição foi proibida limitando-se o passo de tempo.

Em outros aplicativos, como descrito por WOOD e LINGIREDDY (2009), verificou-se que a solução empregada foi a flexibilizar o comprimento de cada trecho, de tal forma que seja possível atender exatamente a relação (19). Um comprimento fictício é calculado, de forma que não há necessidade de interpolação e o fenômeno de difusão numérica não ocorre. A consequência negativa é que a adutora simulada deixa de corresponder exatamente à real. Neste método, adota-se uma tolerância para a diferença entre o comprimento real e o comprimento fictício. Em nossa experiência, para obter uma tolerância razoável (por exemplo, 10 m) é necessário um grande aumento do número de nós em relação ao método anterior. Para o futuro, planeja-se adotar uma combinação da abordagem atual com a abordagem de comprimentos fictícios, de forma a continuar limitar o número total de nós e simultaneamente melhorar o atendimento ao passo de tempo ideal.

A perda de carga por fricção (coeficiente R na equação 5) foi calculada, ao longo da linha característica, usando a vazão média entre a vazão no instante anterior e a vazão no instante atual. Esta opção requer uma série de iterações, uma vez que a vazão no instante atual é função da fricção. Empiricamente, verificou-se que após quatro iterações a vazão converge satisfatoriamente. Contudo, observou-se alguma instabilidade numérica quando o número de nós é reduzido, devido à grande variação de vazão ao longo da linha característica. O efeito visível é uma oscilação da vazão ao longo da tubulação, que não corresponde a nenhum fenômeno físico real.

Na implementação atual, considera-se uma tubulação principal com duas extremidades apenas. À montante, pode-se instalar uma bomba, caracterizando um trecho escoado por recalque, ou um reservatório, caracterizando um trecho escoado por gravidade. Em projetos mais complexos, há derivações para reservatórios secundários e para abastecimento de redes de água. A implementação do método das características para estes casos não é consideravelmente mais complexa que para uma tubulação única.

Contudo, é necessário incluir na simulação o cálculo da rede ramificada, para gerar a condição inicial de vazão no sistema. Para simplificar o módulo de simulação e de entrada de dados, optou-se por aproximar as derivações por pontos de descarga, caracterizados por sua vazão nominal quando o sistema está operando normalmente. Durante o transiente, considera-se que estes pontos comportam-se como válvulas parcialmente abertas, dimensionadas para fornecer a vazão nominal do ponto de derivação quando a linha piezométrica encontra-se em sua condição inicial. Desta forma, o cálculo da vazão pode ser feito de forma simplificada, iniciando-se com a vazão de trabalho do sistema a montante e deduzindo a vazão nominal de cada derivação até a extremidade de jusante.

Esta aproximação não é ideal, como ilustrado por um projeto recente analisado com auxílio deste simulador. Nesta análise, identificou-se um risco elevado de sobrepressão na rede, a qual não estava sendo observada na prática. Contudo, inserindo-se um tanque unidirecional no ponto da derivação e calculando-se o volume de água fornecido, observou-se que o volume da própria derivação seria suficiente para estabilizar a curva de pressões. Portanto, é desejável desenvolver suporte para redes generalizadas, como sugerido por JUNG et al. (2007).

O simulador é capaz de calcular o ponto do trabalho do sistema e obter a linha piezométrica inicial, empregando os dados da tubulação e a curva da bomba. Como a vazão de trabalho também é um dado de entrada, a curva da bomba é ajustada através do parâmetro α (Eq. 12) para compatibilizar o ponto de trabalho dado com o ponto calculado pela simulação. Quando este ajuste é excessivo (maior que 10%), o usuário é alertado para corrigir a inconsistência.

A inserção de tanques unidirecionais na tubulação gera uma descontinuidade pontual entre a vazão à montante e à jusante do tanque. O módulo de simulação possui o recurso de registrar e integrar esta diferença ao longo do tempo conforme as equações (10) e (11), totalizando o volume fornecido pelo tanque. Portanto, o tanque real deve ser dimensionado para ser capaz de fornecer no mínimo este volume (acrescido de um coeficiente de segurança). Em alguns casos, este volume é irrisório (da ordem de 1 m³), indicando que a instalação de ventosas, dispositivos simples e de uso comum, pode ser suficiente para o controle das subpressões nestes casos.

Contudo, uma limitação do método das características tal como resumido neste trabalho é a hipótese da continuidade da coluna líquida (BERGANT *et al.*, 2006). Esta hipótese perde a validade quando há a vaporização do líquido devido à subpressão, portanto o projetista deve sempre buscar um arranjo dos dispositivos de combate que previna a vaporização. A abordagem mais simples para o caso em que há separação parcial da coluna líquida (cavitação vaporosa), como é o caso quando uma ventosa admite uma quantidade limitada de ar, é o modelo de cavidade de vapor discreta (DCVM) descrito por BERGANT *et al.* (2006). Além da vazão e pressão em cada ponto da tubulação, é necessário incluir nas equações a quantidade de vapor formado ou de ar admitido em cada nó. Este é um dos pontos a serem desenvolvidos no aplicativo, provavelmente empregando a metodologia descrita por SHU (2003). Por outro lado, a separação total da coluna gera picos de pressão muito severos, não sendo recomendável dimensionar a tubulação neste regime. O aplicativo deverá apenas alertar o usuário quando detectar tal separação, sem tentar aplicar as técnicas mais avançadas necessárias para a simulação da separação total.

Um último ponto de atenção é o detalhamento das condições reais na bomba e nos reservatórios. Na saída da bomba, considera-se que sempre há uma válvula de retenção para a proteção da mesma contra uma onda de sobrepressão que poderia inverter a direção do fluxo. Contudo, uma subpressão na bomba provoca uma vazão superior à capacidade máxima de bombeio da mesma, o que pode também gerar danos. O simulador comporta a hipótese de uma válvula de *bypass*, a qual conecta diretamente o reservatório de alimentação da bomba com a tubulação. O uso desta opção altera de forma significativa o resultado, devendo sempre refletir a configuração real do sistema. Outro detalhe importante é a entrada de água no reservatório a jusante, a qual pode ser feita pelo fundo (ou seja, o reservatório pode alimentar a rede em caso de subpressão) ou pelo topo (o reservatório apenas recebe líquido mas não é capaz de alimentar a rede). Neste último caso, a simulação considera uma válvula de retenção na saída da tubulação, com o efeito de gerar uma subpressão considerável no reservatório. Outra forma de entender este resultado é imaginar que o reservatório a jusante com entrada pelo fundo é um dispositivo de combate ao golpe de aríete, fornecendo água para mitigar esta subpressão.

DESAFIOS DE USABILIDADE

A implementação do módulo de entrada de dados e visualização foi feita na linguagem de programação Python, pelos motivos discutidos na seção anterior e para máxima compatibilidade com o módulo de simulação. Dentre as bibliotecas de interface com o usuário suportadas pelo Python, foram analisadas o wxPython (2013) e o PyQt (RIVERBANK, 2013). Foi selecionado o PyQt devido a experiência prévia dos autores com a biblioteca QT, contudo ambas as opções se mostraram adequadas para este projeto. A geração de gráficos é feita com o auxílio da biblioteca matplotlib (HUNTER, 2013), selecionada por ser uma biblioteca de boa qualidade, fácil uso e ativamente em desenvolvimento.

O desenvolvimento do módulo de entrada de dados partiu da observação da rotina de trabalho do projetista em alguns casos específicos. O objetivo principal é adequar a interação com o aplicativo à rotina de trabalho, expondo o mínimo de funcionalidade necessário para a obtenção de resultados de boa qualidade.

Os seguintes princípios foram adotados:

- Escolher valores padronizados para parâmetros da simulação (como discretização), de forma que todas as entradas de dados sejam relativas ao problema, e não às particularidades do método das características;
- Solicitar apenas dados básicos e calcular os parâmetros derivados (por exemplo, a celeridade, constante de tempo K_b da bomba);
- Seguir uma sequência de projeto que corresponde à interpretação do projetista;
- Permitir alterações e ajustes no projeto com visualização rápida dos seus resultados, principalmente quanto ao posicionamento de dispositivos de prevenção de golpe de aríete.

Como exemplos do princípio de não solicitar dados relativos ao método, o número total de nós foi fixado em 50 pontos no módulo de entrada de dados, apesar de ser configurável na biblioteca de cálculo. Este número forneceu um bom balanço entre o grau de detalhe no gráfico final de envoltórias de pressão e tempo de simulação. Planeja-se incluir estes parâmetros em uma lista de opções avançadas, para usuários que precisem deste grau de controle. Similarmente, limita-se o tempo da simulação a um múltiplo do tempo da linha. A biblioteca de simulação oferece a opção de selecionar este múltiplo. Quando o usuário não escolhe outro múltiplo, padroniza-se o tempo da simulação em oito vezes o tempo da linha para trechos por gravidade e doze vezes o tempo da linha para trechos por recalque.

O caso básico de utilização adotado para guiar o planejamento da interface com o usuário foi o seguinte:

- Importa-se os dados do perfil topográfico da canalização sujeita aos transientes;
- O sistema é subdividido em trechos, a serem simulados de forma independente;
- Para cada trecho, é fornecido um conjunto de dados indispensáveis para as simulações. Cada trecho pode ser subdividido em segmentos, que podem ter diâmetros e materiais diferentes;
- Dentro do trecho, podem existir derivações (para as quais se informa a vazão) e dispositivos de atenuação de picos de pressão (para os quais se informa o nível mínimo de água);
- A partir dos dados de entrada, é gerado um relatório contendo dados de entrada e dados derivados, além dos resultados da simulação;
- Finalmente, a partir das telas dos gráficos da simulação é possível interagir com o programa, introduzindo dispositivos para combate aos efeitos dos transientes e visualizando os respectivos resultados.

Estes passos são ilustrados utilizando o projeto conceitual da Figura 4. Neste exemplo, temos o trecho EB1 – R1 do tipo recalque, com uma bomba a montante e o trecho R1 – R2 do tipo gravidade, com uma válvula a jusante.

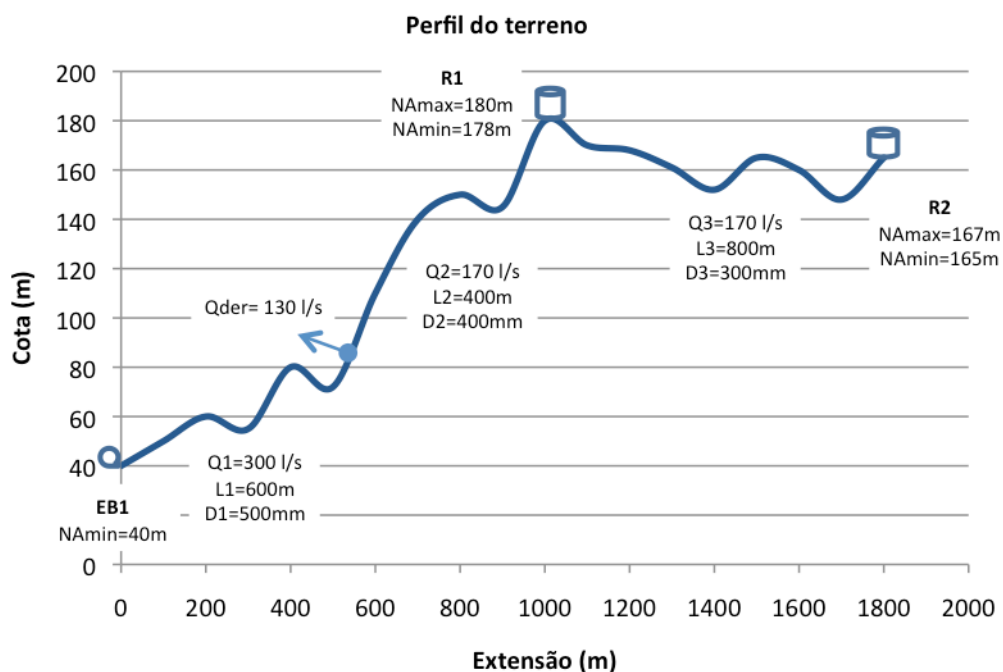
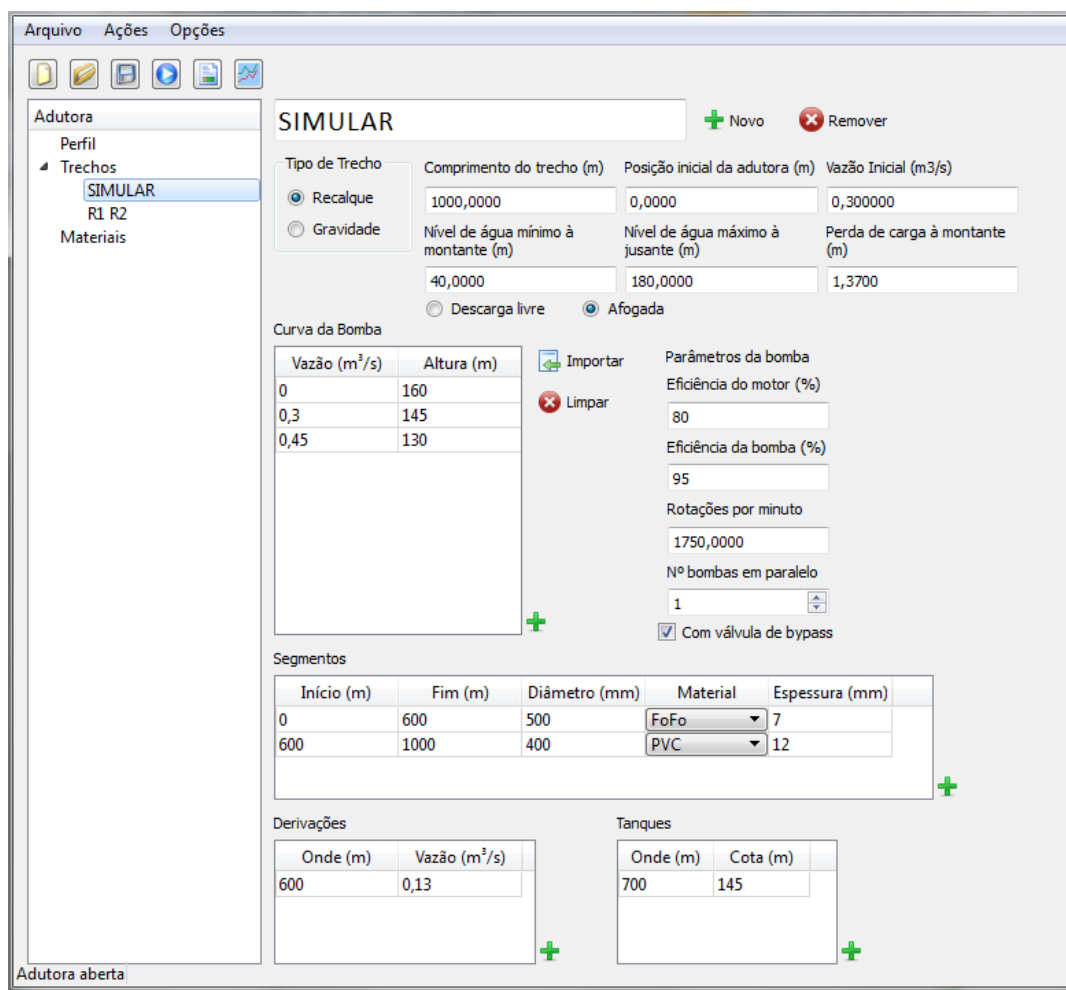


Figura 4. Concepção do projeto

Optou-se por realizar a importação de dados topográficos através de um arquivo texto, que pode ser gerado em uma planilha eletrônica utilizando as opções de salvar como arquivo texto ou separado por vírgulas. Necessita-se apenas de duas colunas, o comprimento do caminhamento da origem até o ponto e a cota do mesmo, ambos em metros. Cada trecho é posicionado dentro deste caminhamento através da coordenada do ponto inicial.

A entrada de dados para cada trecho é feita utilizando a tela principal do módulo de entrada de dados, mostrada na Figura 5. Os dados incluem informações sobre a bomba, reservatórios a montante e jusante, características dos segmentos do trecho e dados das derivações e tanques unidirecionais.



SIMULAR + Novo - Remover

Tipo de Trecho

☒ Recalque ☐ Gravidade

Comprimento do trecho (m): 1000,0000

Posição inicial da adutora (m): 0,0000

Vazão Inicial (m3/s): 0,300000

Nível de água mínimo à montante (m): 40,0000

Nível de água máximo à jusante (m): 180,0000

Perda de carga à montante (m): 1,3700

☐ Descarga livre ☒ Afogada

Curva da Bomba

Vazão (m³/s)	Altura (m)
0	160
0,3	145
0,45	130

Importar Limpar

Parâmetros da bomba

Eficiência do motor (%): 80

Eficiência da bomba (%): 95

Rotações por minuto: 1750,0000

Nº bombas em paralelo: 1

☒ Com válvula de bypass

Segmentos

Início (m)	Fim (m)	Diâmetro (mm)	Material	Espessura (mm)
0	600	500	FoFo	7
600	1000	400	PVC	12

Derivações

Onde (m)	Vazão (m³/s)
600	0,13

Tanques

Onde (m)	Cota (m)
700	145

Adutora aberta

Figura 5. Interface de entrada de dados para o trecho EB1 – R1

Os trechos podem ser do tipo “Recalque” ou “Gravidade”. Trechos por recalque pressupõem a existência de bombas para impulsionar o fluido, enquanto que trechos por gravidade pressupõem o transporte de água entre dois reservatórios, possuindo uma válvula de bloqueio no final do trecho. A simplificação da interface ao considerar apenas estes dois tipos de trecho foi considerada mais importante que a flexibilidade de criação de outros esquemas.

Em um trecho por recalque, são requeridos dados da bomba. A curva da bomba requer no mínimo três pontos da curva de trabalho, sendo sugeridos a altura manométrica máxima (*shut-off*), o ponto de trabalho do sistema e um terceiro ponto com vazão superior à vazão de trabalho. Estes dados também podem ser importados. O programa ajusta uma curva quadrática para a bomba, conforme a equação (12).

Em trechos por gravidade, são necessários o diâmetro e o tempo de fechamento da válvula. É possível mitigar os transientes aumentando o tempo de fechamento. Para referência, o aplicativo mostra o tempo da linha (o tempo necessário para um pulso de pressão percorrer a distância de montante a jusante). Sugere-se adotar um tempo de fechamento superior a este tempo da linha, sempre com suporte da simulação. Em geral, nos trechos por gravidade o golpe de aríete só ocorre se houver um fechamento brusco de uma válvula. No caso das válvulas de gaveta, o fechamento por natureza já é lento. No caso de adoção de válvulas do tipo borboleta, para evitar o risco de fechamento brusco, as mesmas devem ser providas de mecanismos de retardo de fechamento.

As adutoras podem ter apenas um segmento de igual diâmetro ou serem compostas de vários trechos de diâmetros diferentes, com diâmetros, materiais e espessuras distintos. Os dados básicos do material (módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e rugosidade) são informados separadamente. Estes dados já estão disponíveis no aplicativo para três materiais de uso corrente: ferro fundido dúctil cimentado internamente ou aço, PVC (equivalente a PVC DEFOFO, RPVC, PVC PBA) e PRFV (compósitos).

A partir dos dados de entrada, é gerado um relatório contendo dados de entrada e dados derivados (Tabela 1), além dos resultados da simulação (Tabela 2). Isto visa a verificação dos dados e correção de distorções, além de auxiliar a composição de uma memória de cálculo. A versão final do relatório inclui também os gráficos descritos abaixo.

Tabela 1 – Dados de entrada e dados derivados

DADOS	VAL.	DADOS DA BOMBA	VAL.	DADOS DA SIMULAÇÃO	VAL.
Vazão inicial (l/s)	300.00	Constante H0 (m)	160.00	Número de divisões	38.00
H montante (m)	183.63	Constante B	-16.67	Tempo da simulação	21.59 s
Fator de fricção	0.016	Constante C	-111.11	Tempo da linha	1.80 s
Perda de carga total (m)	3.63	Constante Kb	0.64	Passo de tempo	0.05 s
Comprimento trecho 1 (Ferro Fundido) (m)	600.00	Eficiência do motor (%)	80.00		
Perda de carga do trecho 1 (m)	2.26	Eficiência da bomba (%)	95.00		
Derivação (vazão l/s)	130.00	Momento de inércia (kg.m ²)	26.47		
Comprimento trecho 2 (PVC) (m)	100.00	Potencia (CV)	763.14		
Perda de carga do trecho 2 (m)	0.34	Bombas em paralelo	1.00		
Tanque unidirecional (cota, m)	145.00				
Comprimento trecho 3 (PVC)	300.00				
Perda de carga do trecho 3	1.03				

Tabela 2 – Resultados da simulação

DISTÂNCIAS	LP RP	LP Hmin	LP Hmax	COTAS	PRES MAX	PRES MIN
0.00	183.63	73.06	242.69	40.00	202.69	33.06
100.00	183.25	76.54	234.09	50.00	184.09	26.54
200.00	182.87	81.02	224.36	60.00	164.36	21.02
300.00	182.50	89.14	218.21	55.00	163.21	34.14
400.00	182.12	98.97	211.28	80.00	131.28	18.97
500.00	181.74	110.89	207.49	72.00	135.49	38.89
600.00	181.37	124.51	203.35	110.00	93.35	14.51
700.00	181.03	145.00	201.68	140.00	61.68	5.00
800.00	180.68	145.15	207.71	150.00	57.71	-4.85
900.00	180.34	145.31	201.32	145.00	56.32	0.31
1000.00	180.00	180.00	180.00	180.00	0.00	-0.00

Os gráficos gerados mostram as linhas correspondentes ao perfil da adutora, as linhas piezométricas, de regime permanente de escoamento e dos transientes (máxima e mínimas pressões, bem como a linha do nível estático do reservatório de jusante, para cada trecho.

Os gráficos da Figura 6 mostram o efeito da inclusão de um dispositivo de combate ao golpe na envoltória de pressões. Visando facilitar a localização dos TAUs, é possível abrir o relatório de gráficos e percorrer com o cursor sobre o perfil. São apontadas as distâncias e as respectivas cotas dos pontos. É possível ainda visualizar as curvas do volume fornecido e da vazão dos tanques ao longo do tempo, para o dimensionamento do volume total e das válvulas e linhas que conectam o tanque à adutora.

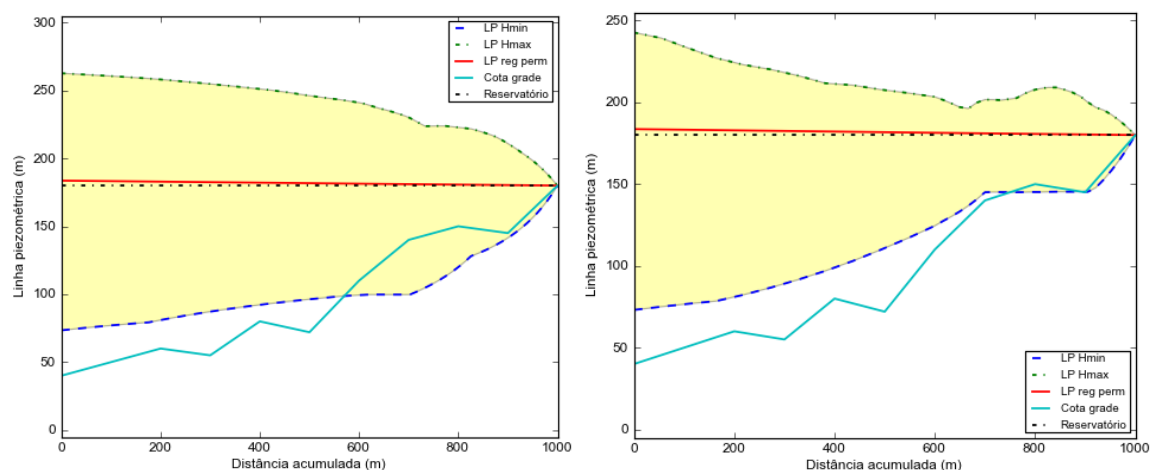


Figura 6. Linhas piezométricas para o trecho EB1 – R1 sem (esquerda) e com (direita) dispositivo de atenuação de picos de pressão posicionado a 700 m.

Na Figura 6, é possível observar o comportamento do simulador quando a linha piezométrica cai abaixo da cota do terreno. Este resultado implica em pressões negativas no interior da tubulação, que não são físicas. Devido ao risco de separação parcial ou total da coluna, é recomendado incluir dispositivos de controle do golpe de aríete. O resultado da simulação, na presença de pressões negativas, não é confiável pelos motivos discutidos na seção anterior. Para apresentação dos resultados em reservatório, a pressão é limitada a -10 m, correspondendo a um vácuo. A Figura 7 mostra um caso em que as pressões foram limitadas artificialmente.

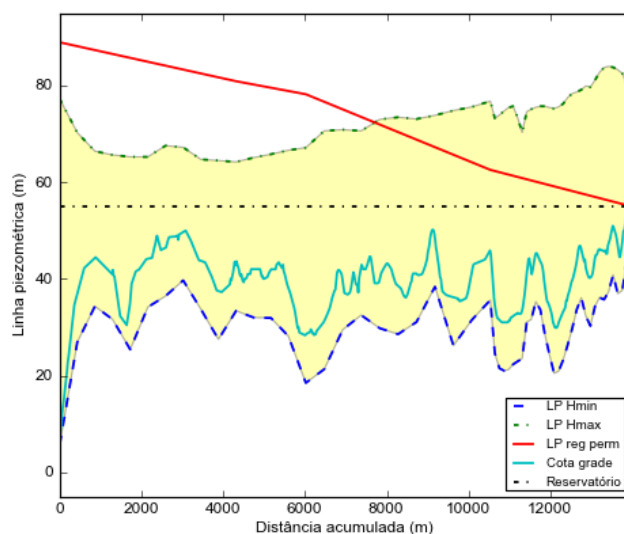


Figura 7. Trecho com pressões mínimas limitadas artificialmente

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Comprovou-se que a aplicação da ferramenta discutida neste trabalho produz os resultados esperados, com simplicidade, rapidez e precisão compatíveis com as condições de projeto. Através das hipóteses adotadas no cálculo, foi possível simplificar ao máximo a interação com o usuário, sem comprometer a qualidade dos resultados. Como o aplicativo foi desenhado de acordo com o fluxo de trabalho do projetista, foi possível empregar os resultados em projetos reais, com menos esforço que seria necessário utilizando os aplicativos tradicionais.

Como trabalho futuro, planeja-se (i) a incorporação de uma interface gráfica para obtenção dos dados georeferenciados dos dutos; (ii) a associação do aplicativo a um pacote mais geral de modelagem hidráulica, de

forma que possa ser aplicado a todas as configurações de canalizações, inclusive para redes de distribuição de água; (iii) a inclusão de novas condições de contorno, como os efeitos de ventosas, reservatórios hidropneumáticos e válvulas de retenção especiais e (iv) o tratamento numérico da separação parcial de coluna. Está em estudo a disponibilização de partes deste aplicativo dentro da filosofia de código aberto (OSI, 2013), se houver interesse da comunidade científica em contribuir para o desenvolvimento, por exemplo, implementando os conceitos avançados revisados por GUIDAOUI et al. (2005).

Observou-se durante a elaboração de projetos utilizando este aplicativo que, em muitos casos, é provável que o uso de ventosas e válvulas de retenção especiais seja uma alternativa viável e de maior simplicidade operacional, além de menores custos de operação e manutenção, ao uso de tanques unidirecionais. Através de simulações, é possível buscar soluções mais simples que possam produzir efeitos benéficos, sem prejuízo da funcionalidade no combate aos efeitos das ondas transientes de subpressão e sobrepressão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT. NBR 12215:1991 – Projeto de adutora de água para abastecimento público – Procedimento. ABNT, 1991.
2. BARBOSA, M. P. R., CASTRO, M. A. H., ARAÚJO, J. K. Modelagem computacional de chaminés de equilíbrio e tanques de alimentação unidirecional como dispositivos atenuadores do golpe de aríete em adutoras. Em: VI Seminário Ibero-Americano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água (SEREA), João Pessoa, 2006.
3. BERGANT, A., ANGUS R. S., ARRIS S. T. Water hammer with column separation: A historical review. *Journal of Fluids and Structures* 22(2) 135-171, 2006.
4. CAMARGO, Luiz A. O golpe de aríete em condutos. Análise pelo método das características. Em: XVI Encontro de Engenheiros de Assistência Técnica – Tubos e Conexões Tigre S.A., Joinville, 1991.
5. CHAUDHRY, M. Hanif. *Applied Hydraulic Transients*. Nova York: Van Nostrand Reinhold, 2ª edição, 1987.
6. COOKE, D. Fast numerical array expression evaluator for Python and NumPy. <https://code.google.com/p/numexpr/>, última visita: abril/2013.
7. DUDLIK, A., SCHLUTER, S., HOYER, N., PRASSER, H. M. Pressure surges - experimental investigations and calculations with software codes using different physical models and assumptions. Em: BHR Group Conference Series Vol. 39, pp. 279-290. Professional Engineering Publishing, 1998.
8. Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH). CTran – Software para análise de transitórios em redes de abastecimento: Manual do usuário. FCTH, 2002.
9. GHIDAOU, M. S., ZHAO, M., MCINNIS, D. A., AXWORTHY, D. H. A review of water hammer theory and practice. *Applied Mechanics Reviews* 58(1/6) 49, 2005.
10. HUNTER, J. D. matplotlib: Python plotting. <http://matplotlib.org>, última visita: abril/2013.
11. JUNG, B. S., KARNEY, B. W., BOULOS, P. F., WOOD, D. J. The need for comprehensive transient analysis of distribution systems. *Journal (American Water Works Association)* 99(1) 112-123, 2007.
12. OLIPHANT, T. Scientific Computing Tools for Python – NumPy. <http://numpy.org>, última visita: abril/2013.
13. OPEN SOURCE INITIATIVE (OSI). The open source definition. <http://opensource.org/osd>, última visita: abril/2013.
14. PARMAKIAN, J. *Waterhammer Analysis*. Nova York: Prentice Hall, 1970.
15. PyPy developers. Fast, compliant alternative implementation of the Python language. <http://pypy.org>, última visita: abril/2013.
16. PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. Python Programming Language. <http://python.org>, última visita: abril/2013.
17. RIGHETTO, Antonio M. Considerações sobre o Golpe de Aríete em Instalações Hidráulicas. Dissertação de Mestrado. EESC/USP, 1972.
18. RIVERBANK COMPUTING. PyQT – a set of Python bindings for Digia's QT application framework. <http://riverbankcomputing.com/software/pyqt/intro>, última visita: abril/2013.
19. ROSICH, Enrique M. *El Golpe de Aríete em Impulsiones*, Madrid: Bellisco, 1987.
20. SANTOS, R. M. N., CASTRO, M. A. H. Modelagem computacional de transientes hidráulicos em sistemas de recalque. Em: I Seminário Ibero-Americano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água (SEREA), João Pessoa, 2002.
21. SHU, J. J. Modelling vaporous cavitation on fluid transients. *International journal of pressure vessels and piping* 80(3) 187-195, 2003.

22. STREETER, Victor L., WYLIE, E. Benjamin. Fluid Transients. Nova York: McGraw-Hill, 1978.
23. SWIG developers. Simplified Wrapper and Interface Generator. <http://swig.org>, última visita: abril/2013.
24. WOOD, D. J. Waterhammer Analysis—Essential and Easy (and Efficient). Journal of environmental engineering 131(8) 1123-1131, 2005.
25. WOOD, D. J., LINGIREDDY, S. Pipe2010: Surge modeling tips and procedures. Em: Surge for Pipe2010 User's Guide. KYPipe LLC., 2009.
26. WOOD, D. J., LINGIREDDY, S., BOULOS, P. F., KARNEY, B. W., MCPHERSON, D. L. Numerical methods for modeling transient flow in distribution systems. Journal (American Water Works Association) 97(7) 104-115, 2005.
27. wxPython developers. wxPython: a GUI toolkit for the Python programming language. <http://wxpython.org>, última visita: abril/2013.