

# Análise comparativa das funções de abertura e fechamento de válvulas de alívio de pressão

## Comparative analysis of the opening and closing functions of pressure relief valves

• **Data de entrada:**  
17/04/2022

• **Data de aprovação:**  
12/09/2022

José Paulo da Silveira Neto<sup>1\*</sup> | Lucas Florêncio da Cunha Teixeira<sup>1</sup> |  
Vicente de Castro Sanders Neto<sup>1</sup> | Bruno Araújo Paiva<sup>1</sup> | João Marcelo Costa Barbosa<sup>1</sup> |  
Marco Aurélio Holanda de Castro<sup>1</sup>

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2023.054>

### ORCID ID

Silveira Neto JP  <https://orcid.org/0000-0002-4392-4102>

Teixeira LFC  <https://orcid.org/0000-0002-7964-4970>

Sanders Neto VC  <https://orcid.org/0000-0002-1106-0880>

Paiva BA  <https://orcid.org/0000-0002-6971-6184>

Barbosa JMC  <https://orcid.org/0000-0003-0559-0516>

Castro MAH  <https://orcid.org/0000-0001-5134-7213>

### Resumo

A eficácia da válvula de alívio de pressão na proteção de adutoras durante o transitório hidráulico está sujeita ao seu comportamento de abertura e de fechamento. O objetivo deste trabalho é determinar o efeito de diferentes funções de abertura e fechamento de válvulas de alívio durante o golpe de aríete causado pela parada abrupta de uma bomba centrífuga em adutoras. Foram analisadas quatro funções, assim como a situação de válvula com abertura e fechamento imediatos. Foram simuladas três adutoras utilizando o Método das Características, incluindo o modelo de Cavidade de Gás Livre Discreto com celeridade variável. A primeira e a terceira função foram as que apresentaram uma atenuação mais eficaz das ondas de sobrepressão, por apresentarem um fechamento mais lento e gradual. As demais funções e a válvula de abertura e fechamento imediatos provocaram sobrepressões secundárias nos trechos mais a jusante da adutora, próximo à entrada do reservatório de jusante.

**Palavras-chave:** Válvula de alívio de pressão. Abertura e fechamento. Transitório hidráulico.

### Abstract

*The efficiency of the pressure relief valve in protecting water pipelines during hydraulic transients is subject to its opening and closing behavior. This work aims to determine the effect of different opening and closing functions of relief valves during water hammer caused by the abrupt shut-off of a centrifugal pump in water pipelines. Four functions were analyzed, as well as the valve situation with immediate opening and closing. Three water pipelines were simulated using the Characteristics Method, including the Discrete Free Gas Cavity model with variable wave speed. The first and third functions were the ones that showed a more effective attenuation of the overpressure waves, as they presented a slower and more gradual closing. The other functions and the immediate opening and closing valve caused secondary overpressures in the further downstream sections of the pipeline, close to the downstream reservoir inlet.*

**Keywords:** Pressure relief valve. Opening and closing. Hydraulic transients.

<sup>1</sup> Universidade Federal do Ceará (Campus Pici) - Fortaleza - Ceará - Brasil.

\* **Autor correspondente:** [js\\_silveirant@hotmail.com](mailto:js_silveirant@hotmail.com).

## 1 INTRODUÇÃO

As válvulas de alívio de pressão (*Pressure Relief Valves*, ou PRV) são dispositivos atenuadores de pressão instalados em sistemas de condutos forçados para evitar que as sobrepressões originadas a partir de eventos causadores de transitório hidráulico, como parada de bombas ou fechamento de válvulas, superem a resistência máxima do material (SOARES; COVAS; RAMOS, 2013; KÖPPL; FEDOSEYEV; HELMING, 2019).

Essas válvulas são projetadas para atuar automaticamente a partir de um valor de pressão pré-determinado, chamado pressão de ajuste, descarregando fluido e evitando ou minimizando o aumento da pressão de operação acima de um limite pré-estabelecido (BAHADORI, 2016). A válvula fecha quando as condições normais de pressão do sistema são reestabelecidas.

A válvula de alívio de pressão do tipo mola é uma das mais utilizadas em instalações para garantir a segurança operacional (ORTEGA; PIRES; NIECKELE, 2008). O dimensionamento da válvula de alívio obedece às normas ASME Seção VIII e API 520 (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2008), relacionando vazão de alívio com as características geométricas da válvula e com o diferencial de pressão (montante e jusante) em condição de regime permanente, desprezando o seu caráter dinâmico.

A operação inadequada da PRV causa muitos danos ao sistema, tais como a diminuição da capacidade de descarga, uma função insuficiente da regulação de pressão constante ou proteção contra sobrepressão e a ressonância de todo o sistema de tubulação ou danos graves na superfície de vedação da PRV (MA; PAN, 2020).

É importante entender o comportamento dinâmico da válvula de alívio durante o transitório hidráulico para uma correta simulação computacional, ou seja, conhecer o tempo de resposta e o comportamento da descarga em função

da abertura da válvula. Contudo, esse comportamento não é estabelecido em norma e raramente é disponibilizado pelos fabricantes (FILGUEIRAS et al., 2014; PÉREZ, 2016). Muitos dos programas comerciais de simulação de transientes também não contam com um modelo dinâmico de válvula de alívio, adotando simplificações de regime permanente.

Pérez (2016) analisou experimentalmente o comportamento dinâmico de um modelo de PRV e constatou que o coeficiente de descarga em regime permanente não proporciona uma adequada representação do comportamento real da válvula para eventos de transientes rápidos.

Ortega et al. (2009) desenvolveram um modelo bidimensional simplificado de PRV e implementaram uma equação dinâmica que define a posição do disco da válvula em função do tempo. Partindo da solução da forma transiente da equação de conservação de massa, os autores obtiveram as distribuições de velocidade e pressão na válvula, possibilitando a determinação do coeficiente de descarga em função da abertura da válvula.

A abertura da válvula é proporcional ao excesso de pressão na tubulação à montante, em relação à pressão de ajuste (CHAUDRY, 2014). À medida que a força devido à pressão do fluido no orifício de entrada supera a força da mola, o disco da válvula é levantado, permitindo que o fluido escape. O desequilíbrio de forças no sentido oposto provoca o fechamento da válvula (PÉREZ, 2016).

Lyu et al. (2021), por meio de uma análise de sensibilidades dos tempos de abertura e fechamento da PRV, constataram que, quanto menor o tempo de abertura da válvula (0,5 s), melhor a eficácia na atenuação das sobrepressões, em função da rápida resposta da válvula em descarregar água. Por sua vez, os autores observaram que o fechamento da válvula deve ocorrer lentamente para garantir a proteção contra o golpe de aríete. Se

a válvula fechar rapidamente, será gerada uma nova onda de sobrepressão. A análise de sensibilidade mostrou que a eficiência da proteção contra o golpe de aríete pode ser melhorada pela função adequada de abertura e fechamento da válvula de alívio. Trabalhos como os de Riasi e Tazraei (2017) buscaram otimizar essa função.

Segundo Bell et al. (2020), embora todas as válvulas de alívio de pressão sejam projetadas para abrir no ponto de pressão definido, o desempenho da válvula depende do tipo de válvula. Para modelar com precisão o que acontece quando uma válvula alivia, é importante saber como é o comportamento de abertura e fechamento da válvula. Os autores apresentam um conjunto de curvas, para diferentes tipos de válvulas, que relacionam o excedente de pressão e a abertura da válvula.

Apesar da importante contribuição, Bell et al. (2020) não realizaram a modelagem dessas válvulas para analisar como os diferentes comportamentos de abertura e fechamento influenciam o alívio das sobrepressões em um evento de transitório hidráulico. Na literatura também não foram encontrados trabalhos que tratam o tema com essa abordagem. Acredita-se que uma modelagem dessa natureza trará uma grande contribuição para elucidar o comportamento dinâmico das válvulas de alívio de pressão e sua influência na proteção de sistemas hidráulicos.

Portanto este trabalho tem como objetivo propor um modelo matemático para as PRVs e determinar o efeito de diferentes funções de abertura e fechamento da válvula durante o golpe de aríete causado pela parada abrupta de uma bomba centrífuga em adutoras. Para isso foi desenvolvido um modelo computacional considerando o modelo da coluna elástica de água, adaptado a um modelo de cavitação e aplicado ao método das características, para simulação do transitório hidráulico.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Modelagem Numérica e Computacional

Para a descrição matemática do escoamento transiente em condutos forçados, adota-se um conjunto de pressupostos físicos denominado modelo da coluna elástica. A hipótese desse modelo é de que as paredes do conduto são linearmente elásticas, o escoamento é unidimensional, e a dissipação de energia é expressa por uma formulação quase permanente (FERREIRA; BARBOSA; CASTRO, 2016).

Muitos trabalhos utilizaram um modelo numérico, que tem como princípio o Método das Características (MOC) (CHAUDRY, 2014; LYU et al., 2021), cuja base de cálculo inicial é determinar a linha piezométrica entre dois pontos, em regime permanente, pela equação de Bernoulli, para obter os valores de carga e vazão em todos os nós do sistema; a descrição do escoamento transiente é feita em termos das equações do momento e da continuidade. (BARBOSA; CASTRO, 2014; SANDERS NETO; BARBOSA; CASTRO, 2020).

Neste trabalho foi utilizado o modelo numérico proposto e implementado computacionalmente por Paiva et al. (2021), que utiliza o MOC e o modelo de Cavidade de Gás Livre Discreto (DGCM) com celeridade variável modificada (NGUYEN, 2009).

A utilização desse modelo em contrapartida do uso exclusivo do MOC se deu por conta de sua melhor performance numérica e adequação às condições de contorno da válvula de alívio de pressão e às diferentes funções de abertura e fechamento da válvula.

A condição de contorno da válvula de alívio de pressão para o MOC é dada pela Eq. 1 (BARBOSA; CASTRO, 2014; CHAUDRY, 2014).

$$Q_{P_v} = C_d A_v \alpha \sqrt{2g(H_{P_{i,n+1}} - z_o)} \quad (1)$$

Onde  $Q_{P_v}$  é a vazão descarregada pela válvula a cada passo de tempo [ $L^3T^{-1}$ ];  $C_d$  é o coeficiente de descarga da válvula;  $A_v$  é a área de abertura da válvula [ $L^2$ ];  $\alpha$  é a fração de abertura da válvula (em função da pressão na válvula);  $g$  é a aceleração da gravidade [ $LT^{-2}$ ];  $H_{P_{i,n+1}}$  é a carga piezométrica na seção (i,n+1) [L], imediatamente anterior ao nó da válvula; e  $z_o$  é a cota do nó da válvula [L].

Pela equação da continuidade, para cada passo de tempo, tomou-se o cálculo da vazão conforme Eq. 2 (RIASI; TAZRAEI, 2017).

$$Q_{P_{i,n+1}} = Q_{P_v} + Q_{P_{i+1,1}} \quad (2)$$

Onde  $Q_{P_{i,n+1}}$  é a vazão na seção (i,n+1) [ $L^3T^{-1}$ ]; e  $Q_{P_{i+1,1}}$  é a vazão na seção (i+1,1) [ $L^3T^{-1}$ ], imediatamente depois do nó da válvula. Assume-se que a perda de carga na válvula é negligenciável (RIASI; TAZRAEI, 2017), portanto a carga  $H$  [L] é definida pela Eq. 3.

$$H_{P_{i,n+1}} = H_{P_{i+1,1}} \quad (3)$$

As equações da válvula de alívio de pressão foram implementadas no módulo UFC7 do Sistema UFC (PAIVA et al., 2021), desenvolvido pelo Laboratório de Hidráulica Computacional (LAHC), do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA), da Universidade Federal do Ceará (UFC).

## 2.2 Funções de abertura e fechamento da válvula de alívio

Foram analisados quatro tipos de válvulas de alívio com suas respectivas funções de abertura e fechamento, adaptadas de Bell et al. (2020), conforme Fig. 1. Essas válvulas foram a “Spring Loaded (Liquid)”, a “Modulating Action Pilot”, a

“ASME VIII”, e a “ASME I”. Devido à necessidade de compatibilização das funções de abertura com o modelo numérico, foram feitas algumas alterações em três dessas funções, com exceção da “Modulating Action Pilot”. Essas alterações consistiram na inclinação dos trechos verticais dos gráficos originais, que representavam uma mudança brusca da abertura da válvula para um mesmo valor de pressão.

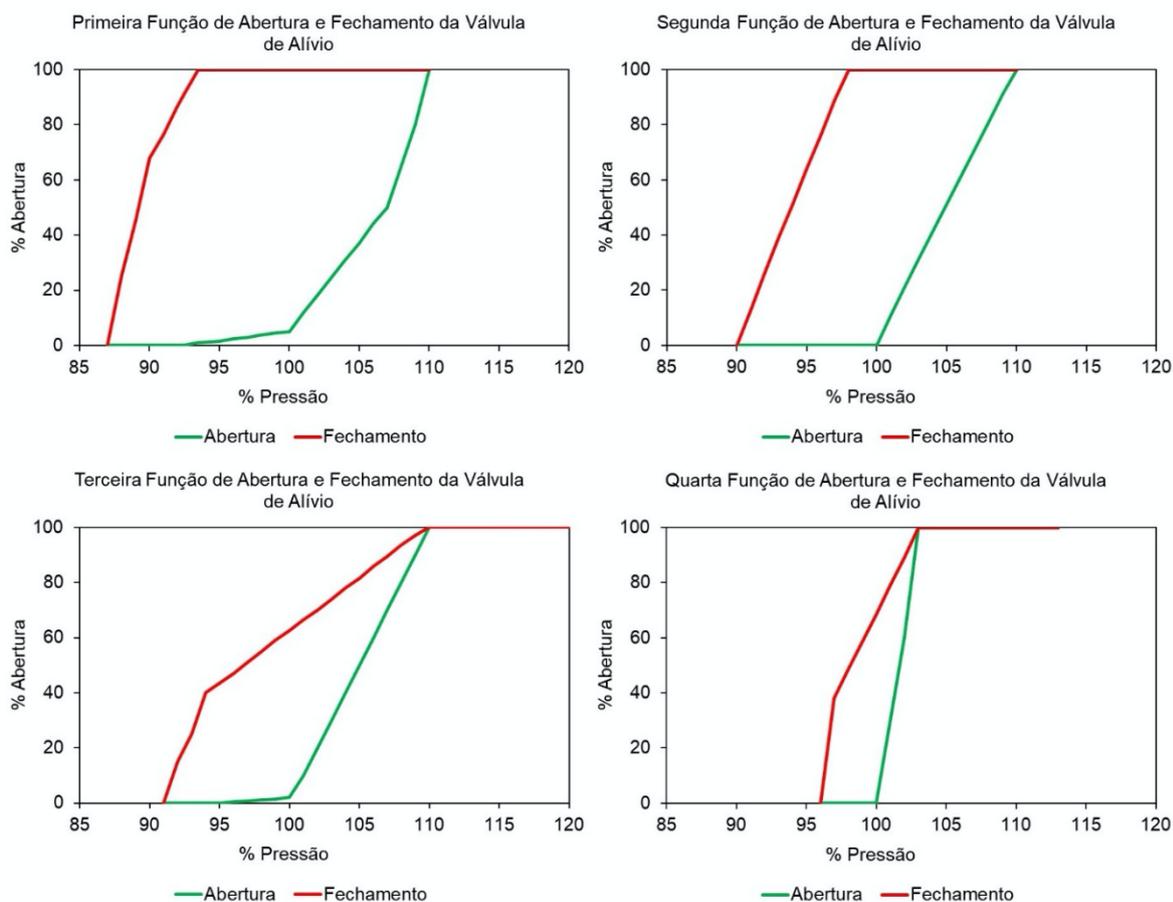
Nos gráficos, “% Pressão” representa a relação entre a pressão máxima transiente e a pressão permanente no nó onde a válvula de alívio foi inserida. A primeira função foi adaptada da válvula “Spring Loaded (Liquid)”. Até 92,5% de pressão, a válvula permanece completamente fechada; a partir de então, a válvula começa a abrir gradativamente até uma fração de abertura de 5%, quando a pressão atinge 100%. Em seguida a abertura ocorre de forma mais acentuada, e quando a pressão atinge 107%, a válvula encontra-se 50% aberta. A válvula fica completamente aberta quando a pressão atinge 110%. No fechamento, a válvula permanece 100% aberta até a pressão ser reduzida a 93,5%; a partir desse valor, a válvula fecha gradativamente, encontrando-se 68% aberta quando a pressão reduz para 90%, e completamente fechada quando a pressão reduz para 87%.

A segunda função foi a da válvula “Modulating Action Pilot”. Até 100% de pressão a válvula permanece completamente fechada. A partir desse valor, a válvula abre gradativamente, de forma linear, até estar completamente aberta, quando a pressão atinge 110%. Quando a pressão é reduzida para 98%, a válvula passa a se fechar linearmente até seu fechamento total, quando a pressão atinge 90%.

A terceira função foi adaptada da válvula “ASME VIII”. A válvula começa a abrir quando a pressão ultrapassa 95%. Inicialmente ocorre uma abertura suavizada até a pressão atingir 100%. Nesse momento, a válvula encontra-se apenas 2%

aberta. Acima desse valor de pressão, ocorre uma abertura mais acentuada. A válvula atinge 100% de abertura quando a pressão aumenta para 110%. O fechamento da válvula se inicia logo

quando a pressão decresce um pouco dos 110%. Quando a pressão reduz para 94%, a válvula está 40% aberta; e quando a pressão reduz para 91%, a válvula fecha completamente.



**Figura 1** - Funções de abertura e fechamento da válvula de alívio de pressão. Fonte: Adaptado de Bell et al. (2020).

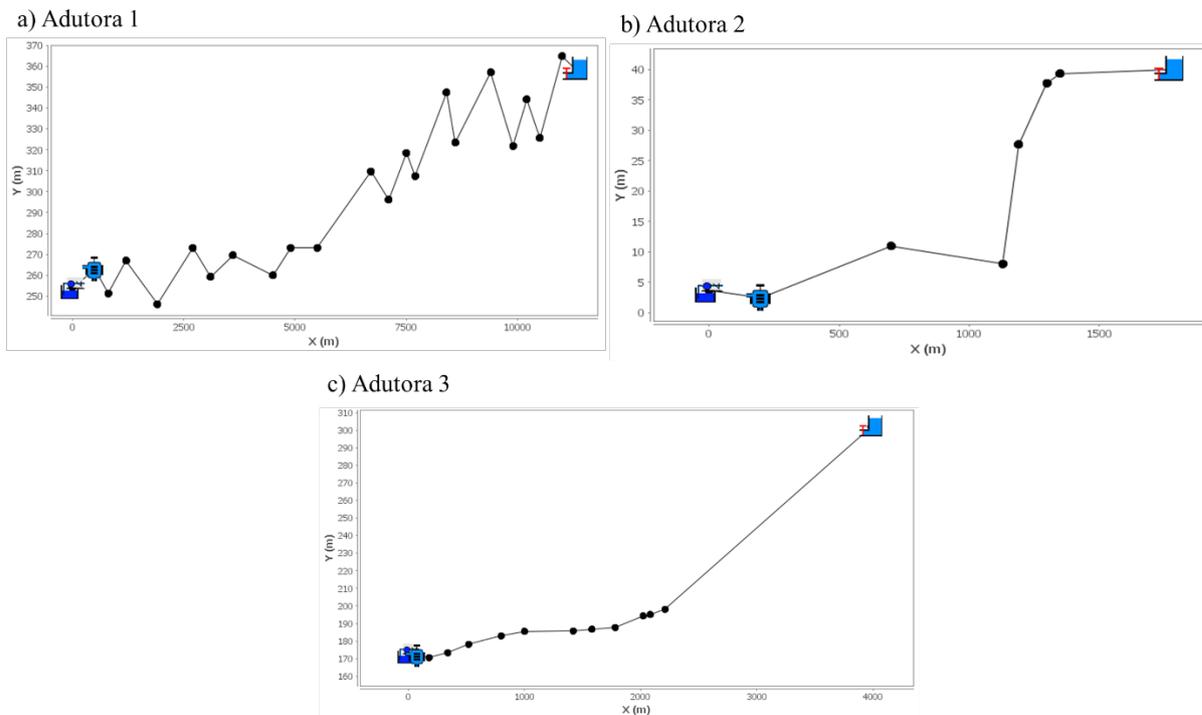
Por sua vez, a quarta função foi adaptada da válvula “ASME I”. A válvula começa a abrir quando a pressão ultrapassa 100% e abre completamente quando a pressão atinge 103%. Quando a pressão reduz imediatamente abaixo de 103%, inicia-se o fechamento da válvula, que é completado quando a pressão reduz para 96%.

### 2.3 Simulações do transitório hidráulico em adutoras

As quatro funções de abertura e fechamento da válvula de alívio de pressão foram implementadas no

programa UFC7 para a realização das simulações de transitório hidráulico, a partir do desligamento da bomba centrífuga. A porcentagem de abertura da válvula em função da pressão é adicionada ao cálculo da vazão na forma do coeficiente  $\alpha$  da Eq. 1.

As simulações foram realizadas em 3 adutoras reais (Fig. 2), nas quais, originalmente, não havia válvula de alívio. A locação de uma válvula de alívio de pressão nas adutoras é uma situação fictícia e, como tal, não existem dados reais de pressões máximas e mínimas para as situações com válvula de alívio, que podem servir como base de comparação.



**Figura 2** - Representação dos perfis das adutoras simuladas no UFC7: a) Adutora 1; b) Adutora 2; c) Adutora 3.

Nas três adutoras, a condição de montante é definida por um reservatório de nível fixo, uma bomba centrífuga e uma válvula de retenção; e o nó de jusante é definido por outro reservatório fixo, em

cota superior. As válvulas de alívio de pressão foram inseridas no segundo nó de cada uma das adutoras. A Tabela 1 apresenta uma síntese das características das adutoras, e das respectivas PRVs.

**Tabela 1** - Características físicas das três adutoras simuladas e suas respectivas válvulas de alívio de pressão.

	Adutora 1	Adutora 2	Adutora 3
Extensão (km)	11,3	1,77	3,98
Diferença de cotas (m)	104	39,39	129
Material	FoFo K7 JTI	PVC DEFoFo	FoFo K7 JTI
Diâmetro Nominal (mm)	150	300	500
Tipo de PRV	Metálica	Metálica	Metálica
Diâmetro da PRV (mm)	25	50	50
Pressão de abertura da PRV (mca)	150	50	99

Além das simulações com as 4 funções de abertura e fechamento, o transitório hidráulico nas adutoras foi simulado com válvula de alívio de pressão de abertura e fechamento imediatos e sem válvula de alívio, para verificar a influência das funções de abertura e fechamento da válvula sobre as sobrepressões.

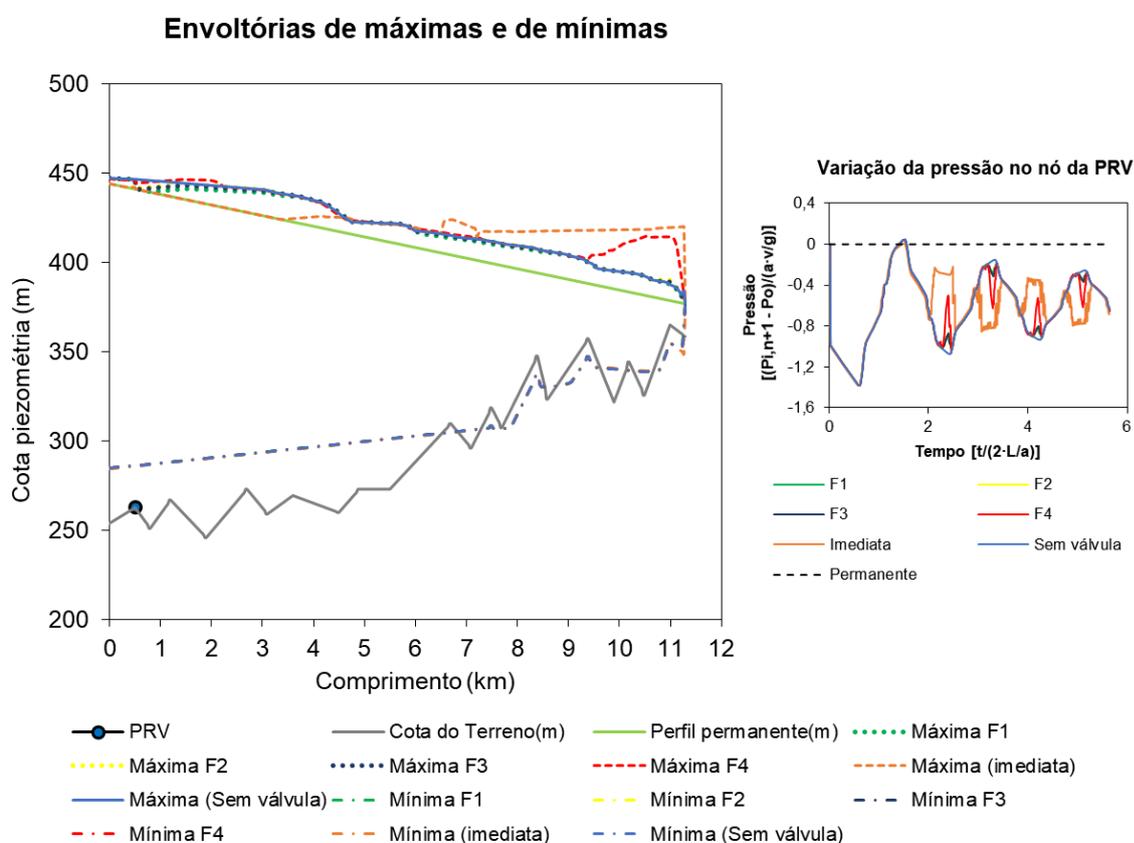
As envoltórias de pressões máximas e mínimas resultantes das simulações do transitório hidráulico nas adutoras, para cada tipo de função de abertura e fechamento da PRV, e para as situações sem válvula, e com válvula de abertura e fechamento imediatos, foram comparadas e analisadas de forma gráfica.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Adutora 1

As envoltórias de pressões máximas e de pressões mínimas para as seis situações analisadas

(as quatro funções da PRV, PRV de abertura e fechamento imediatos e adutora sem PRV) foram plotadas em um mesmo gráfico, junto com a carga hidráulica em regime permanente e o perfil da adutora, como mostra a Fig. 3.



**Figura 3** - Envoltórias de máxima e de mínima resultantes da simulação do transitório hidráulico na Adutora 1, com válvula de alívio de pressão de 25 mm; e variação da pressão no nó da válvula de alívio de pressão.

Nos trechos iniciais da adutora sem válvula de alívio de pressão, a sobrepressão ultrapassa a pressão máxima de serviço do material, que é de 190 mca, chegando ao valor máximo de 197,16 mca em  $x = 1,87$  km. Em relação às subpressões, os trechos críticos da adutora se iniciam a partir de aproximadamente 6,5 km, ponto em que as pressões mínimas se tornam negativas, ocorrendo cavitação em diferentes pontos da adutora. O modelo de Paiva et al. (2021) utilizado neste trabalho limita a pressão relativa mínima ao valor

de -10,33 mca, equivalente à pressão de vapor da água.

A Tabela 2 apresenta uma síntese de resultados importantes das simulações, como a pressão máxima verificada ao longo da adutora; o aumento ou redução máximos das envoltórias de sobrepressão proporcionados pela válvula de alívio de pressão, em relação à simulação sem a válvula; e a pressão máxima no nó da válvula ao longo do tempo.

A instalação da PRV com abertura e fechamento imediatos, no segundo nó da adutora ( $x = 0,5$  km), aliviou a sobrepressão no início da adutora, até aproximadamente 5,7 km, aproximando as pressões máximas às pressões no regime permanente, e reduzindo a pressão em até 14 mca, em  $x \cong 3$  km. Entretanto, nos trechos

mais a jusante da adutora houve um considerável acréscimo de pressão, em valores que chegam em até 38,06 mca, próximo à entrada do reservatório de jusante. Lyu et al. (2021) explicam que o rápido fechamento da PRV ocasiona ondas de sobrepressão secundárias. Não houve alteração na envoltória de subpressões.

**Tabela 2** - Pressão máxima ao longo da adutora 1, variação máxima da envoltória de sobrepressão, e pressão máxima no nó da válvula de alívio de pressão.

Simulação	Adutora			Nó da Válvula		
	Pressão máx (mca)	Distância (km)	Variação máx (mca)	Distância (km)	Pressão máx (mca)	Tempo (s)
Sem válvula	197,16	1,87	-	-	183,62	27,11
1ª função	194,49	1,87	-6,33	0,80	183,56	27,07
2ª função	197,00	1,87	-5,07	11,27	183,59	27,07
3ª função	196,40	1,87	-5,46	0,55	183,57	27,11
4ª função	200,07	1,87	27,07	11,05	183,18	27,03
Imediata	190,00	0,00	38,06	11,22	179,25	26,37

Não houve divergência significativa entre os resultados das simulações com as três primeiras funções de abertura e fechamento da válvula, que não causaram uma grande mudança nas envoltórias de máximas. A jusante da válvula com a primeira função de abertura e fechamento, a pressão foi reduzida em até 6,33 mca ( $x = 0,8$  km), em relação à ausência da válvula de alívio. Já a 4ª função de abertura e fechamento apresentou resultados menos promissores. Além de não amenizar as sobrepressões, a partir de 9 km da adutora, houve um acréscimo de pressão de até 27 mca ( $x = 11,05$  km). A curva de fechamento dessa função da válvula (Fig. 1) indica, devido ao elevado coeficiente angular das retas, um fechamento mais rápido que as demais funções da válvula.

No gráfico de variação da pressão no nó em que a válvula de alívio de pressão foi inserida, a pressão foi normalizada e adimensionalizada com a finalidade de simplificar a análise dos resultados. No eixo das abscissas, utilizou-se a relação entre o tempo computacional ( $t$ ) [T] e tempo de viagem

da onda de pressão ( $2 \cdot L/a$ ) [T], sendo  $L$  o comprimento total da adutora [L], e  $a$  a celeridade da onda [ $LT^{-1}$ ]. Já no eixo das ordenadas, utilizou-se a relação entre a diferença da pressão no nó no tempo  $t$ , e a pressão inicial ( $P_{i,n+1} - P_o$ ) [L], com o número de Joukowski ( $a \cdot v/g$ ) [L], sendo  $v$  [ $LT^{-1}$ ] a velocidade do escoamento, e  $g$  [ $LT^{-2}$ ] a aceleração da gravidade (PAIVA et al., 2021)

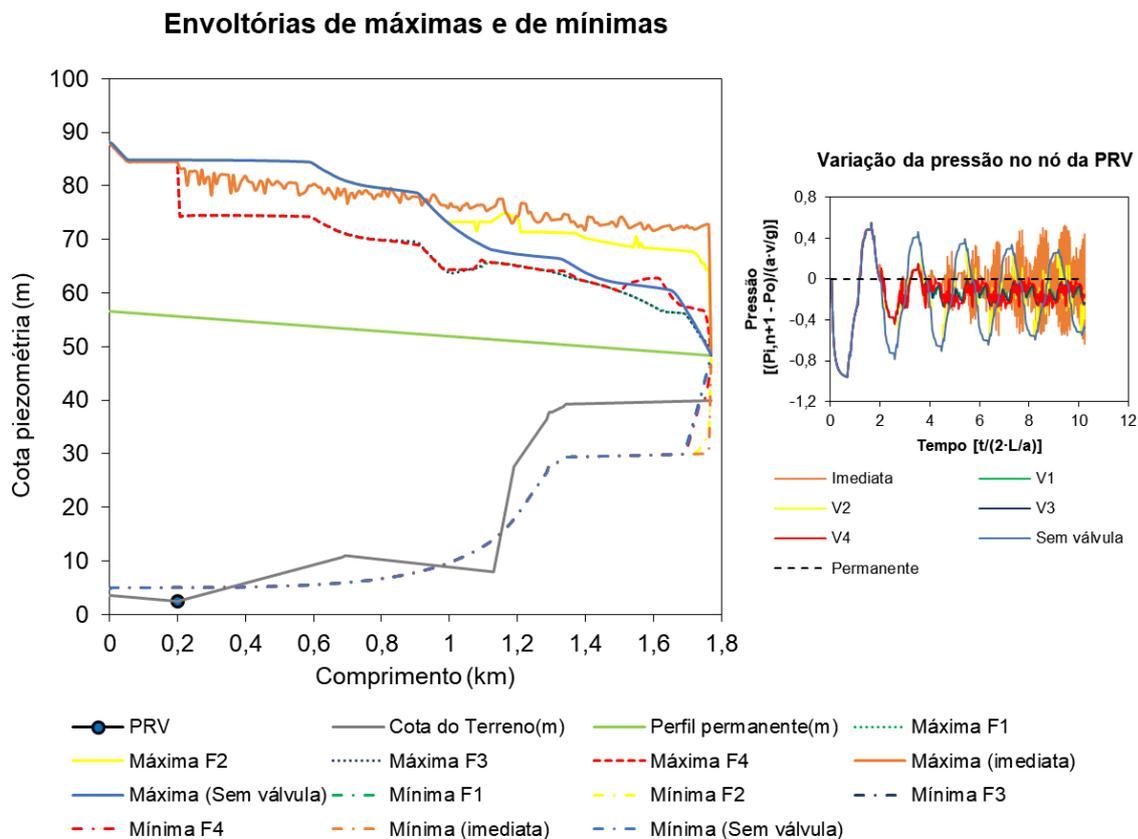
O transitório hidráulico iniciou-se com uma onda de subpressão, seguida da onda de sobrepressão, para a qual, em todas as situações simuladas com válvula, não houve um efeito amortecedor significativo em seu pico (em torno de 27 s). Acredita-se que esse resultado é devido ao coeficiente de descarga da válvula de alívio (PÉREZ, 2016), que liberou uma vazão insuficiente para uma rápida redução do excesso de pressão.

Apenas nas ondas subseqüentes, com a válvula aberta, houve redução nos picos de pressão (máximos e mínimos). Nas cinco simulações com PRV, a frequência de variação da pressão aumentou, ao passo que sua magnitude dimi-

nuiu. Esse comportamento, no entanto, foi mais evidente na simulação com a 4ª função da válvula, e com a válvula de abertura e fechamento imediatos, situações em que a abertura da válvula é mais rápida.

### 3.2 Adutora 2

A Fig. 4 apresenta os gráficos nos quais foram plotadas as envoltórias de máximas e de mínimas para a Adutora 2, assim como a variação da pressão no nó da válvula de alívio de pressão.



**Figura 4** - Envoltórias de máxima e de mínima resultantes da simulação do transitório hidráulico na Adutora 2, com válvula de alívio de pressão de 50 mm; e variação da pressão no nó da válvula de alívio de pressão.

Na simulação sem a válvula de alívio de pressão, a sobrepressão não ultrapassou a pressão máxima de serviço do material em nenhum trecho da adutora. Em relação às subpressões, os trechos críticos da adutora iniciam-se a partir 0,35 km, ponto em que as pressões mínimas se tornaram negativas. A inserção da PRV em nenhum dos casos influenciou na envoltória de mínimas.

Dentre as funções de abertura e fechamento da PRV, a 1ª, a 3ª e a 4ª promoveram uma significativa redução na envoltória de máximas a jusante do nó em que a válvula foi inserida, a 0,2 km do reservatório de montante, onde houve uma diminuição de aproximadamente -10,5 mca, como mostra a Tabela 3. A 4ª função, no entanto, aumentou a sobrepressão nos últimos 300 m da adutora, chegando a um aumento de 5,66 mca em  $x \approx 1,75$  km, comportamento semelhante ao observado na Adutora 1.

**Tabela 3** - Pressão máxima ao longo da adutora 2, variação máxima da envoltória de sobrepressão, e pressão máxima no nó da válvula de alívio de pressão.

Simulação	Adutora			Nó da Válvula		
	Pressão máx (mca)	Distância (km)	Variação máx (mca)	Distância (km)	Pressão máx (mca)	Tempo (s)
Sem válvula	84,50	0,00	-	-	82,31	16,08
1ª função	84,21	0,00	-10,48	0,21	82,08	16,08
2ª função	84,47	0,00	15,24	1,76	82,29	16,08
3ª função	84,21	0,00	-10,48	0,21	82,08	16,08
4ª função	84,19	0,00	-10,49	0,21	82,07	16,08
Imediata	84,19	0,00	23,48	1,76	81,98	16,10

A simulação com válvula de alívio de pressão de abertura e fechamento imediatos resultou numa redução da envoltória de sobrepressão a jusante do nó da válvula de alívio até  $x \cong 0,93$  km. A partir desse ponto, a válvula de alívio aumentou a sobrepressão no restante da adutora, em até 23,48 mca, na entrada no reservatório de jusante. Observou-se também uma intensa variação da pressão máxima ao longo da adutora.

A 2ª função de abertura e fechamento da válvula foi a situação que resultou na simulação com os piores resultados. A PRV não foi capaz de amenizar a sobrepressão em nenhum trecho da adutora; em vez disso, aumentou a pressão em até 15,24 mca na entrada do reservatório de jusante.

No gráfico da variação da pressão no nó da PRV é possível visualizar que, assim como na Adutora 1, a válvula de alívio só começou a amortecer a pressão depois da primeira onda de sobrepressão, quando a relação  $t/(2 \cdot L/a)$  é aproximadamente 2. As válvulas simuladas com a 1ª, a 3ª e a 4ª funções conseguiram amortecer a variação da pressão no tempo subsequente. A válvula dotada com a 2ª função de abertura e fechamento não foi capaz de amenizar a variação da pressão em nenhum momento da simulação. Por sua vez, a válvula de abertura e fechamento imediatos aumentou a variação da pressão, resultando em picos de pressão cada vez mais críticos ao longo do tempo.

### 3.3 Adutora 3

A Fig. 5 apresenta os gráficos nos quais foram plotadas as envoltórias de máximas e de mínimas para a Adutora 3, assim como a variação da pressão no nó da PRV.

Na simulação sem a válvula de alívio de pressão, a sobrepressão ultrapassou a pressão máxima de serviço do material em quase toda a adutora, exceto nos últimos 500 m. Em relação às subpressões, os trechos críticos da adutora iniciam-se a partir de 2,57 km, ponto em que as pressões mínimas se tornaram negativas. A inserção da PRV, em nenhum dos casos, influenciou na envoltória de mínimas.

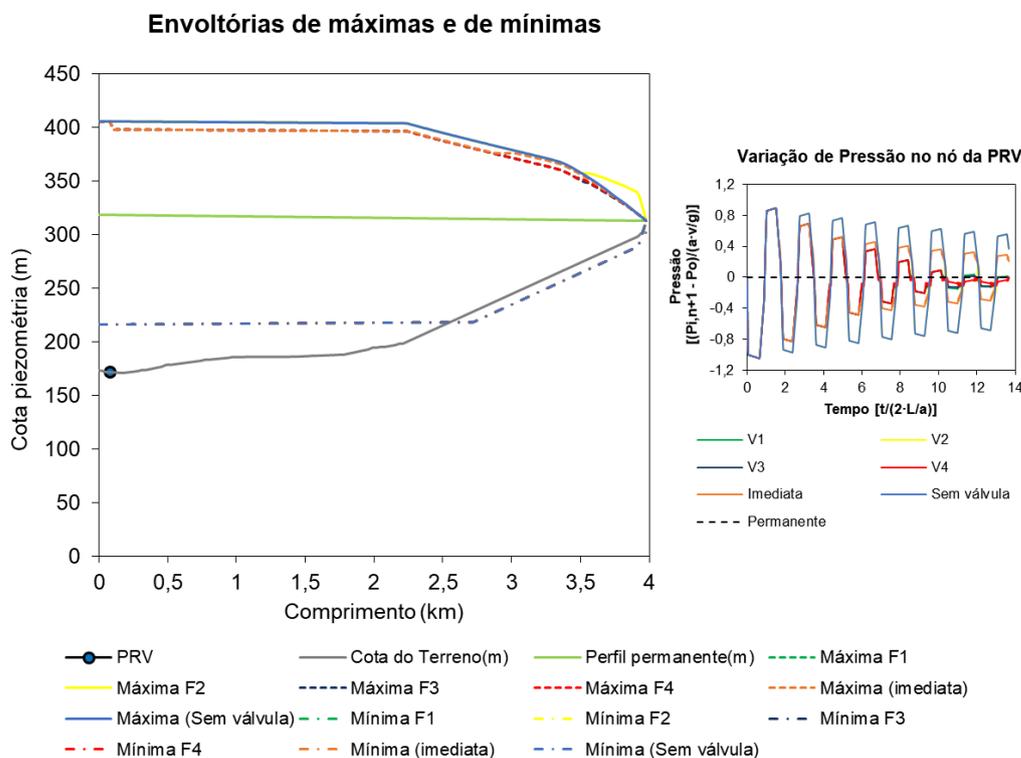
Dentre as funções de abertura e fechamento da PRV, a 1ª, a 3ª e a 4ª apresentaram os mesmos resultados e reduziram as envoltórias de máximas a jusante da válvula, inserida a 80 m do reservatório de montante, onde houve uma diminuição de aproximadamente -7,48 mca, como mostra a Tabela 4.

A simulação com válvula de alívio de abertura e fechamento imediatos reduziu a envoltória de sobrepressão a jusante do nó da válvula de alívio, na mesma medida em que as funções 1, 3 e 4, até  $x \cong 2,75$  km. A partir desse ponto, amenizou-se o efeito amortecedor da válvula.

Novamente a 2ª função de abertura e fechamento da PRV foi a situação que resultou na simulação com os piores resultados. A válvula não foi capaz de amenizar a sobrepressão em nenhum trecho da adutora; em vez disso, aumentou a pressão em até 19,23 mca na entrada do reservatório de jusante.

No gráfico da variação da pressão no nó da PRV, é possível visualizar o mesmo comportamento apresentado nas duas adutoras anteriores. A válvula de alívio só começou a amortecer a pressão depois da

primeira onda de sobrepressão, quando a relação  $t/(2 \cdot L/a)$  é aproximadamente 2. As válvulas simuladas com a 1ª, a 3ª e a 4ª funções apresentaram o mesmo comportamento e conseguiram amortecer a variação da pressão no tempo subsequente, de uma maneira mais eficaz que a válvula de abertura e fechamento imediatos. Já a válvula dotada com a 2ª função de abertura e fechamento não conseguiu, em nenhum momento da simulação, amenizar as ondas de sobrepressão e de subpressão.



**Figura 5** - Envoltórias de máxima e de mínima resultantes da simulação do transitório hidráulico na Adutora 3, com válvula de alívio de pressão de 50 mm; e variação da pressão no nó da válvula de alívio de pressão.

**Tabela 4** - Pressão máxima ao longo da adutora 2, variação máxima da envoltória de sobrepressão, e pressão máxima no nó da válvula de alívio de pressão.

Simulação	Adutora			Nó da Válvula		
	Pressão máx (mca)	Distância (km)	Varição máx (mca)	Distância (km)	Pressão máx (mca)	Tempo (s)
Sem válvula	234,54	0,16	-	-	233,90	11,08
1ª função	233,89	0,05	-7,48	0,11	233,87	11,08
2ª função	234,54	0,16	19,23	3,92	233,90	11,08
3ª função	233,89	0,05	-7,48	0,11	233,87	11,08
4ª função	233,89	0,05	-7,48	0,11	233,87	11,08
Imediata	233,86	0,05	-7,51	0,11	233,84	11,08

## 4 CONCLUSÕES

As funções de abertura e fechamento da válvula de alívio de pressão possuem considerável influência sobre sua eficácia no amortecimento das ondas de pressão originadas em um transitório hidráulico em adutoras. É importante selecionar a função da válvula de alívio que apresente a melhor relação entre tempo, pressão e fração de abertura, uma vez que os resultados das simulações variam bastante em função dessas grandezas.

A válvula de alívio de pressão com abertura e fechamento imediatos do orifício, por apresentar uma abertura mais rápida, conseguiu garantir uma razoável redução da pressão a jusante, nos trechos subsequentes à válvula. Entretanto, como o fechamento da válvula também é imediato, foi gerada uma onda de sobrepressão secundária, que determinou significativo acréscimo de pressão nos trechos finais das adutoras, na entrada do reservatório de jusante. Comportamento semelhante, porém menos acentuado, foi verificado nas simulações com a PRV dotada com a 4ª função de abertura e fechamento, uma vez que a fração de abertura da válvula varia bastante com o gradiente de pressão e, consequentemente, em um curto espaço de tempo.

As funções 1 e 3 apresentaram uma atenuação mais eficaz das ondas de sobrepressão nas três adutoras analisadas, e não houve divergência entre seus resultados. Essas duas funções apresentam uma abertura menos sensível à variação da pressão, o que justifica sua resposta mais lenta que as duas situações anteriores; porém o fechamento também é mais lento e gradual, evitando o surgimento de novas ondas de sobrepressão.

A segunda função foi a que se mostrou menos indicada para as Adutoras 2 e 3, uma vez que, além de não amenizar a sobrepressão em grande parte das adutoras, gerou consideráveis acréscimos de pressão nos trechos finais. A curva de abertura é semelhante às das funções 1 e 3, porém o fecha-

mento, em função da redução da pressão, é mais acentuado e mais rápido.

Diante desses resultados, acredita-se que a PRV que teria um melhor desempenho no controle das sobrepressões seria uma que apresentasse abertura imediata ou mais sensível ao aumento da pressão, como a da função 4; e um fechamento lento e gradual, como das funções 1 e 3.

Apesar de reduzir a sobrepressão, a PRV, por si só, não provocou uma diminuição da pressão suficiente para que toda a adutora estivesse trabalhando abaixo da pressão máxima de serviço (no caso das adutoras 1 e 3); a válvula de alívio também não surtiu efeito no controle das pressões negativas nas adutoras. Uma alternativa é a utilização da PRV em conjunto com um segundo dispositivo de proteção, como o reservatório hidropneumático; e a realização de novas simulações com as funções de abertura e fechamento da válvula de alívio para verificar as alterações provocadas pela presença desse dispositivo.

## 5 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

**Resumo:** Silveira Neto JP, Teixeira LFC; **Introdução,** Silveira Neto JP; **Materiais e Métodos:** Silveira Neto JP, Teixeira LFC, Sanders Neto VC, Paiva BA, Castro MAH; **Resultados e Discussões:** Silveira Neto JP, Teixeira LFC, Sanders Neto VC, Paiva BA; **Conclusões:** Silveira Neto JP; **Redação – Primeira versão:** Silveira Neto JP; **Redação – Revisão & Edição:** Teixeira LFC, Sanders Neto VC, Paiva BA, Barbosa JMC, Castro MAH; **Infraestrutura:** Castro MAH.

## 6 AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo financiamento desta pesquisa. Ao

Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA) da Universidade Federal do Ceará, pelo suporte técnico.

## 7 REFERÊNCIAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API-STANDART 520. **Sizing, Selection and Installation of Pressure relieving Devices in Refineries**. 8th Edition, 2008.

BAHADORI, A. **Oil and gas pipeline and piping systems: design, construction, management, and inspection**. Oxford, UK: Gulf Professional, 2016. 660 p.

BARBOSA, J. M. C.; CASTRO, M. A. H. de. Modelagem computacional da válvula antecipadora de onda como mecanismo de alívio para o golpe de aríete. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 2, p. 101-114, 2014. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v19n2.p101-114>.

BELL, C.; MOTTAGHI-TABAR, S.; MACFARLAN, K.; QUIROGA, V. Relief valve opening characteristic curves now supported in the Symmetry\* process software platform. **Schlumberger**, 2020.

CHAUDHRY, M. H. **Applied Hydraulic Transients**. 4ª Edição, Columbia, South Carolina, USA: Springer, 2014.

FERREIRA, F. E. F. R.; BARBOSA, J. M. C.; DE CASTRO, M. A. H. Modelagem computacional do golpe de aríete em condutos plásticos. **Revista DAE**, v. 64, n. 202, p. 20-31, 2015. <https://doi.org/10.4322/dae.2015.008>.

FILGUEIRAS, L. M.; CARNEIRO, L. M.; PIRES, L. F. G.; LEVANTINE, N. Projeto de engenharia de sistema para testes dinâmicos de válvulas de alívio em dutos. In: Rio Oil & Gas Expo Conference, 2014, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Disponível em: [http://www.simdut.com.br/Trabalhos/IBP1268\\_14.pdf](http://www.simdut.com.br/Trabalhos/IBP1268_14.pdf).

KÖPPL, T.; FEDOSEYEV, M.; HELMING, R. Simulation of surge reduction systems using dimensionally reduced models. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 145, n. 1, p. 04018079, 2019. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001553](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001553).

LYU, J.; ZHANG, J.; WANG, X.; XU, T. A combined water hammer protective method for optimizing the volume of the air vessel in water supply systems. **AQUA — Water Infrastructure, Ecosystems and Society**, v. 70, n. 8, p. 1217-1230, 2021. <https://doi.org/10.2166/aqua.2021.059>.

MA, W.; PAN, T. Experimental research on the dynamic instability and water hammer effect of pressure relief valve. **International Journal of Fluid Machinery and Systems**, v. 13, n. 1, p. 150-159, 2020. <http://dx.doi.org/10.5293/IJFMS.2019.13.1.150>.

NGUYEN, D. T. **Fluid Transients in Complex Systems with Air Entrainment**. 2009. 161 f. Tese (Doutorado) – National University of Singapore, Singapore, 2009.

ORTEGA, A. J.; AZEVEDO, B. N.; PIRES, L. F. G.; NIECKELE, A. O. Analysis of the discharge coefficient of a spring loaded pressure relief valves during its dynamic behavior. In: International Congress of Mechanical Engineering, 20., 2009, Gramado. **Anais [...]**. Disponível em: <https://www.abcm.org.br/anais/cobem/2009/pdf/COB09-2155.pdf>.

ORTEGA, A. J.; PIRES, L. F. G.; NIECKELE, A. O. Simulação numérica de escoamento incompressível ao longo de uma válvula de alívio de pressão. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 5., 2008, Salvador. **Anais [...]**. Disponível em: <http://www.simdut.com.br/Trabalhos/CON08-0711-final.pdf>.

PAIVA, B. A.; SANDERS NETO, V. C.; BARBOSA, J. M. C.; CASTRO, M. A. H. de. Modelagem computacional do golpe de aríete em adutoras considerando a cavitação no fluido com a fração de vazio. **Revista DAE**, v. 69, n. 233, p. 217-228, 2021. <https://doi.org/10.36659/dae.2021.088>.

PÉREZ, M. J. B. **Estudo do comportamento dinâmico de uma válvula de alívio de pressão do tipo mola**. 2016. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Técnico Científico, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

RIASI, A.; TAZRAEI, P. Numerical analysis of the hydraulic transient response in the presence of surge tanks and relief valves. **Renewable Energy**, v. 107, p. 138-146, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2017.01.046>.

SANDERS NETO, V. C.; BARBOSA, J. M. C.; CASTRO, M. A. H. de. Análise do efeito do golpe de aríete numa adutora com uma junção de ramificação. **Revista DAE**, v. 68, n. 225, p. 135-148, 2020. <https://doi.org/10.36659/dae.2020.058>.

SOARES, A. K.; COVAS, D. I. C.; RAMOS, H. M. Damping analysis of hydraulic transients in pump-rising main systems. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 139, n. 2, p. 233-243, 2013. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000663](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000663).