

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

MARCOS RIUL TONIN

Análise Do Golpe De Aríete:
Estudo de caso para a adutora de água bruta do sistema Capim Branco em Uberlândia/MG

Uberlândia

2024

MARCOS RIUL TONIN

Análise Do Golpe De Aríete:

Estudo de caso para a adutora de água bruta do sistema Capim Branco em Uberlândia/MG

Trabalho de Conclusão de Curso da
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Professora Dra. Alice Rosa Da
Silva

Uberlândia

2024

MARCOS RIUL TONIN

Análise Do Golpe De Ariete:

Estudo de caso para a adutora de água bruta do sistema Capim Branco em Uberlândia/MG

Trabalho de Conclusão de Curso da
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Civil

Uberlândia, 14/11/2024

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente

ALICE ROSA DA SILVA
Data: 28/11/2024 16:14:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>



Documento assinado digitalmente

IRIDALQUES FERNANDES DE PAULA
Data: 28/11/2024 16:49:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Iridalques Fernandes de Paula – Msc (UFU)

Documento assinado digitalmente



BRUNO DE OLIVEIRA LAZARO
Data: 28/11/2024 16:27:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

BRUNO DE OLIVEIRA LAZARO – (UFU)

“Ninguém ignora tudo. Ninguém sabe tudo. Todos nós sabemos alguma coisa. Todos nós ignoramos alguma coisa.”

(FREIRE, 2002, p. 69)

RESUMO

As adutoras são infraestruturas fundamentais em um sistema de abastecimento de água, deste modo, a gestão eficiente e segura dessas infraestruturas é essencial para o bem-estar das comunidades que são dependentes da mesma. Nesse sentido, o estudo do golpe de aríete se revela indispensável, uma vez que pode acarretar impactos significativos nas adutoras, comprometendo, por conseguinte, todo o sistema de abastecimento. Este trabalho teve como objetivo analisar o golpe de aríete na adutora de água bruta da represa Capim Branco, utilizando o *software* ALLIEVI para simulação e avaliação do desempenho do sistema. A metodologia consistiu na caracterização do sistema adutor, modelagem no software e análise de diferentes cenários, considerando a ausência e a presença de dispositivos mitigadores, como ventosas, tanques alimentadores unidirecionais e reservatórios hidropneumáticos. Os resultados mostraram que, sem dispositivos de proteção, a adutora apresentou riscos significativos de cavitação e danos estruturais. O reservatório hidropneumático foi o dispositivo mais eficaz na atenuação das pressões, enquanto as ventosas tiveram impacto limitado. Conclui-se que o uso combinado de dispositivos é essencial para garantir a segurança e a eficiência operacional de sistemas adutores de grande porte.

Palavras-chave: Transiente hidráulico; golpe de aríete; programa Allievi, adutora.

ABSTRACT

Water transmission pipelines are critical infrastructures in water supply systems, and their efficient and safe management is essential for the well-being of dependent communities. In this context, the study of water hammer phenomena becomes indispensable, as it can cause significant impacts on pipelines, potentially compromising the entire supply system. This study aimed to analyze water hammer effects in the raw water pipeline from the Capim Branco reservoir, utilizing the ALLIEVI software for simulation and system performance evaluation. The methodology involved the characterization of the pipeline system, software modeling, and the analysis of different scenarios, considering the absence and presence of mitigating devices such as air valves, one-way surge tanks, and hydropneumatic reservoirs. The results indicated that, without protective devices, the pipeline faced significant risks of cavitation and structural damage. Among the devices evaluated, the hydropneumatic reservoir was the most effective in mitigating pressure surges, whereas air valves showed limited impact. It is concluded that the combined use of mitigation devices is essential to ensure the safety and operational efficiency of large-scale pipeline systems.

Keywords: Hydraulic Transient; Water Hammer; software Allievi, pipeline.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Ventosa simples.....	20
Figura 2 -	Representação de um reservatório hidropneumático.....	21
Figura 3 -	Representação de uma válvula de alívio.....	21
Figura 4 -	Representação de uma válvula de retenção.....	22
Figura 5 -	Representação de uma chaminé de equilíbrio.....	23
Figura 6 -	Representação de um TAU.....	23
Figura 7 -	Representação de um TAU.....	24
Figura 8 -	Representações dos elementos no ALLIEVI.....	27
Figura 9 -	Sistema de captação.....	28
Figura 10 -	Casa de bombas da EEAB.....	29
Figura 11 -	Perfil da adutora e do terreno.....	30
Figura 12 -	Topologia geral da simulação.....	31
Figura 13 -	Dados do Reservatório 1.....	31
Figura 14 -	Cálculo da celeridade.....	32
Figura 15 -	Dados do trecho 1.....	33
Figura 16 -	Perfil do trecho 3.....	33
Figura 17 -	Perfil do trecho 4.....	34
Figura 18 -	Perfil do trecho 5.....	34
Figura 19 -	Perfil trecho 6.....	35
Figura 20 -	Perfil trecho 7.....	35
Figura 21 -	Resumo dos trechos.....	36
Figura 22 -	Dados da estação de bombeamento.....	37
Figura 23 -	Cálculo dos coeficientes de perdas do ramal de união.....	37
Figura 24 -	Pré-dimensionamento do reservatório hidropneumático.....	38
Figura 25 -	Cálculo do Ks.....	39
Figura 26 -	Dados dos TAUs.....	39
Figura 27 -	Interface cenário 1.....	41
Figura 28 -	Envoltória das alturas piezométricas, cenário 1.....	41
Figura 29 -	Interface cenário 2.....	42
Figura 30 -	Envoltória das alturas piezométricas, cenário 2.....	43
Figura 31 -	– Interface cenário 3.....	43

Figura 32 -	Envoltória das alturas piezométricas, cenário 3.....	44
Figura 33 -	Interface cenário 4.....	45
Figura 34 -	Envoltória das alturas piezométricas, cenário 4.....	45
Figura 35 -	Interface cenário 5.....	46
Figura 36 -	Envoltória das alturas piezométricas, cenário 5.....	46
Figura 37 -	Interface cenário 6.....	47
Figura 38 -	Envoltória das alturas piezométricas, cenário 6.....	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EEAB	Estação Elevatória de Água Bruta
TAU	tanque de alimentação unidirecional
RHO	reservatório hidropneumático
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
DMAE	Departamento Municipal de Água e Esgoto
AAB	Adutora de Água Bruta
ONU	Organização das Nações Unidas
Mca	Metros de Coluna d'Água

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo geral	14
2.1	Objetivos específicos	14
3	REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1	Transiente hidráulico	15
3.2	Consequências do transiente hidráulico	17
3.2.1	Variação de pressão	17
3.2.2	Cavitação	18
3.2.3	Separação da Coluna Líquida	18
3.2.4	Vibrações e Ruídos Excessivos	18
3.2.5	Desgaste Prematuro de Componentes	19
3.3	Estruturas de proteção	19
3.3.1	Ventosas	19
3.3.2	Reservatório de ar comprimido ou hidropneumático (RHO)	20
3.3.3	Válvulas de alívio	21
3.3.4	Válvulas de retenção	21
3.3.5	Chaminé de equilíbrio	22
3.3.6	Tanque alimentador unidirecional (TAU)	23
3.3.7	Volante de inércia	24
3.4	NBR 12215 – Projeto de Adutora de Água para Abastecimento Público	24
3.5	Programa ALLIEVI	26
4	MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1	Caracterização do sistema de captação	28
4.2	Aplicação do sistema no <i>software</i> ALLIEVI	30
4.2.1	Reservatórios	31
4.2.2	Tubulações	32
4.2.3	Estação de bombeamento	36
4.2.4	Reservatório hidropneumático	37
4.2.4	Tanques de alimentação unidirecional	38
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
5.1	Cenário 1	41

5.2 Cenário 2	42
5.3 Cenário 3	43
5.4 Cenário 4	44
5.5 Cenário 5	46
5.6 Cenário 6	47
6 CONCLUSÃO.....	49
REFERÊNCIAS.....	50
ANEXOS.....	52

1 INTRODUÇÃO

A ONU (2010), ao destacar a água como um direito humano, ressalta que o acesso à água potável e segura é fundamental para a saúde pública. Dessa forma, o abastecimento inadequado pode resultar na propagação de doenças transmitidas pela água, comprometendo a saúde de indivíduos e comunidades. Assim, é necessário não apenas assegurar a disponibilidade constante, mas também garantir que os padrões de qualidade, segurança e eficiência sejam atendidos.

As adutoras, responsáveis por transportar esse recurso vital desde as fontes de captação até as áreas de consumo, conforme definido por Tsutiya (2006), desempenham um papel essencial no sistema de abastecimento de água. Essas estruturas são projetadas para assegurar a entrega de água em quantidade e qualidade adequadas, contribuindo para a saúde pública e o bem-estar das comunidades, em conformidade com as diretrizes da ONU sobre o acesso à água potável.

O dimensionamento e a manutenção adequados das adutoras são, portanto, cruciais para a sustentabilidade do abastecimento de água. Nesse contexto, a compreensão e análise dos transientes hidráulicos surge como fator fundamental para assegurar a integridade e eficiência desses sistemas. Variações transitórias nas condições do escoamento podem afetar significativamente a estabilidade e a operação do sistema de abastecimento de água. O transiente hidráulico, também conhecido como golpe de aríete, é um fenômeno que ocorre em um conduto forçado quando há uma instabilidade no escoamento do líquido, desencadeada por uma onda ou alteração de pressão que se propaga ao longo da tubulação. (NETTO, 1998)

O software ALLIEVI é utilizado para o cálculo dessa onda de pressão. O ALLIEVE é um programa que permite analisar e verificar os efeitos transitórios de manobras realizadas nos elementos do sistema hidráulico. O programa possibilita a análise do escoamento em redes hidráulicas de condutos forçados, alimentadas por vários reservatórios, com diversas estações de bombeamento e com o escoamento regulado por estações de válvulas, formando redes malhadas, ramificadas ou mistas (ITA-UPV, 2010).

Estudos de caso, como os realizados por Baracho (2021) e Aguiar (2020), demonstram a aplicabilidade do programa ALLIEVE em simulações de cenários reais, nos quais o ajuste

dos parâmetros operacionais e a escolha adequada de dispositivos de proteção se mostraram eficazes na mitigação dos efeitos adversos dos transientes. A utilização de dados reais de sistemas em operação fornece uma base sólida para o teste e validação dos projetos.

Portanto, o trabalho a ser apresentado objetiva diagnosticar um sistema adutor em funcionamento: o sistema de recalque de água bruta de Capim Branco, composto por uma linha de adução com dispositivos de mitigação para o golpe de aríete, incluindo dois Tanques De amortecimento unidirecional, um reservatório hidropneumático e ventosas. Os resultados deste estudo contribuem para o aprofundamento da compreensão sobre o golpe de aríete e a eficácia de dispositivos mitigadores, oferecendo um estudo de caso que pode ser referência para futuras pesquisas.

2 OBJETIVOS .

2.1 Objetivo geral

O objetivo deste estudo é analisar o golpe de aríete na adutora de água bruta do sistema Capim Branco utilizando o software ALLIEVI. A análise visa avaliar o desempenho da adutora sob efeitos do regime transiente e revisar a eficácia dos dispositivos de proteção existentes. O trabalho busca oferecer um diagnóstico detalhado sobre a operação e segurança da adutora.

2.1 Objetivos específicos

- Caracterizar o sistema adutor existente e o regime transiente ao qual está submetido.
- Simular os efeitos dos transientes hidráulicos no projeto atual da adutora utilizando o *software* ALLIEVI.
- Verificar a eficácia dos dispositivos de proteção atualmente presentes na adutora.
- Diagnosticar o comportamento do sistema sob condições transitórias.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Transiente hidráulico

Transientes hidráulicos são variações temporárias na pressão dentro de um sistema de tubulações, ocorrendo em resposta a mudanças abruptas no escoamento de água, como a abertura ou fechamento súbito de válvulas, partidas e paradas rápidas de bombas, ou alterações repentinas na demanda de água. Esses eventos geram ondas de pressão que se propagam ao longo das tubulações, podendo resultar em picos de pressão significativos. O fenômeno, também conhecido como golpe de aríete, envolve a rápida conversão da energia cinética do fluido em energia de pressão e acústica, o que pode gerar danos severos às tubulações. As ondas de pressão resultantes podem exceder a capacidade estrutural dos materiais, causando rupturas e falhas em equipamentos, entre outros problemas operacionais. (BOULOS *et al.*, 2005).

Os estudos sobre transientes hidráulicos, tem início no final do século XIV e se intensificaram no início do século XX com trabalho de autores como Ménabréa (1858 e 1862), Michaud (1878), Von Kries (1883), Frinzell (1898), Joukowski (1900) e Alliévi (1902 e 1913). A formulação clássica desse fenômeno foi estabelecida principalmente por Joukowski e Alliévi, que definiram a carga máxima em uma tubulação através da equação (1). Michaud, em sua análise de 1878, explorou a influência do fechamento de válvulas no fenômeno, propondo a equação (2) para calcular a carga hidráulica. (MASIERO JUNIOR, 2008).

$$H = \frac{aV}{g} \quad (1)$$

$$H = \frac{2VX}{gt} \quad (2)$$

Onde:

- H = Carga máxima;
- a = Celeridade;
- V = Aceleração da gravidade;
- g = Espessura da parede da tubulação;
- X = Comprimento da tubulação;
- t = Tempo de fechamento das válvulas.

Essas análises teóricas foram adaptadas por Alliévi em 1902. Os avanços no estudo dos transientes hidráulicos, incluindo as contribuições de Strickler (1913) e Schnyder (1932), levaram à evolução das metodologias de análise, que passaram de abordagens gráficas para métodos computacionais avançados com a popularização dos computadores na década de 1970, onde foi criado o método das características, responsável por melhores resultados devido a inclusão de fatores como o atrito e compressibilidade do fluido. (MASIERO JUNIOR, 2008).

O termo "golpe de aríete" é utilizado para descrever o impacto violento que essas variações de pressão causam nas paredes das tubulações. Esse fenômeno ocorre quando há uma mudança súbita na velocidade do fluido, como no fechamento rápido de uma válvula ou na parada brusca de uma bomba, gerando uma onda de pressão que se propaga ao longo da tubulação. Essa onda de pressão pode causar um choque intenso contra as paredes do conduto, frequentemente acompanhado por ruídos de marteladas, devido à transformação da energia cinética do fluido em energia de pressão e, em acústica (NETTO *et al*, 1998). Esses ruídos são indicativos da extrema força exercida, que podem danificar a integridade estrutural da tubulação e dos equipamentos conectados a ela, tornando o golpe de aríete um aspecto crítico a ser considerado no projeto e na operação de sistemas hidráulicos.

As ondas de pressão e as variações de vazão se propagam ao longo da tubulação desde seu ponto de início como uma onda de choque, onde os efeitos são mais intensos proporcionalmente à velocidade dessas variações. À medida que essas ondas avançam pela tubulação, ocorrem mudanças constantes de pressão e vazão. Esse processo continua até que o escoamento se estabilize novamente, um fenômeno resultante das perdas de energia devido ao atrito e outros fatores que suavizam as amplitudes das ondas, sem alterar os períodos, até que o sistema finalmente alcance um estado de repouso. (TSUTYIA, 2006).

Bergant *et al.* (2006) afirmam que as ondas de pressão geradas durante o golpe de aríete são influenciadas pelo tipo de material da tubulação e pela sua espessura, o que afeta a celeridade, velocidade de propagação da onda. Uma tubulação mais rígida e com espessura adequada pode suportar melhor os picos de pressão, enquanto materiais menos resistentes podem falhar sob essas condições. Essa relação é fundamental no projeto de sistemas hidráulicos, pois materiais inadequados podem aumentar o risco de danos e rupturas. O estudo de Wylie e Streeter (1979) reforça que a seleção adequada dos materiais é fundamental para

garantir a resistência da tubulação a condições de pressão extremas resultantes do golpe de aríete.

A escolha de materiais como aço, ferro fundido ou PVC influencia não apenas a resistência à pressão, mas também a durabilidade e a vida útil do sistema, implicando em custos operacionais e necessidades de manutenção. (AGOSTINHO E PILOTTO, 2019).

A exposição repetida a transientes hidráulicos, não apenas acelera o desgaste dos materiais e componentes, mas também aumenta a frequência de manutenção e a necessidade de substituição de componentes danificados. Isso, por sua vez, resulta em custos operacionais mais altos e pode comprometer a eficiência do sistema, levando a falhas que afetam diretamente o fornecimento de água para a população. (TASSINARI, 2017).

Portanto, o controle adequado dos transientes hidráulicos é fundamental não apenas para preservar a integridade física do sistema de adução, mas também para garantir a continuidade, segurança e a qualidade do fornecimento de água. Esse controle eficiente reflete diretamente na sustentabilidade e confiabilidade dos serviços de abastecimento.

3.2 Consequências do transiente hidráulico

A seguir, são destacadas as principais consequências decorrentes da ocorrência de transientes hidráulicos em uma linha adutora.

3.2.1 Variação de pressão

De acordo com Faria (2020) se os efeitos transitórios não forem devidamente considerados na fase de projeto, as linhas de recalque podem enfrentar condições de sobrepressão e depressão, o que reduz a durabilidade dos componentes, das conexões e da tubulação. Em casos onde essas pressões atingem magnitudes elevadas, há o risco de rompimento da tubulação. Segundo Tsutiya (2006), essas pressões excessivas podem causar o rompimento de tubulações, vazamentos e até explosões de componentes em pontos frágeis do sistema, comprometendo a confiabilidade e a durabilidade do mesmo.

3.2.2 Cavitação

A cavitação pode vir a ser uma consequência do transiente hidráulico. Como descrito por Wylie e Streeter (1993), esse processo pode gerar danos erosivos nas superfícies internas das tubulações e componentes, como válvulas e rotores, reduzindo a vida útil do sistema.

A cavitação ocorre quando um líquido em movimento passa por uma área de baixa pressão, onde a pressão atinge o nível de seu vapor, formam-se bolhas de vapor que diminuem a densidade do líquido. Essas bolhas, transportadas pelo escoamento, alcançam regiões onde a pressão é superior àquela em que se formaram. A súbita variação de pressão faz com que essas bolhas colapsem rapidamente em um processo de implosão, conhecido como cavitação, que ocorre em frações de segundo. (Porto, 2006)

3.2.3 Separação da Coluna Líquida

Esse fenômeno, similar à cavitação, ocorre quando a depressão na tubulação atinge níveis abaixo da pressão de vapor, levando à formação de cavidades de vapor no seu interior. Essas cavidades podem expandir-se a ponto de preencher completamente a seção da tubulação, ocasionando o fenômeno conhecido como separação de colunas. Essa separação ocorre tipicamente em regiões de cotas elevadas ou convexas ao longo do perfil da tubulação durante a passagem de ondas de pressão negativas. Quando essas ondas se refletem e tornam-se positivas, as colunas separadas se reconectam, gerando uma onda de choque frontal com pressões elevadas, capazes de comprometer a integridade das paredes da tubulação. (MASIERO JUNIOR, 2008).

3.2.4 Vibrações e Ruídos Excessivos

Os transientes hidráulicos produzem vibrações e ruídos indesejados no sistema, o que não apenas indica uma operação irregular, mas também pode comprometer a estabilidade das estruturas ao longo do tempo. Martin (1999), explica que as vibrações causadas por esses picos de pressão afetam diretamente a base e os suportes dos componentes, levando ao desgaste prematuro e à necessidade de manutenção frequente.

3.2.5 Desgaste Prematuro de Componentes

A exposição frequente aos transientes hidráulicos causa um desgaste prematuro de componentes como válvulas, juntas e bombas, pois eles são submetidos a esforços além dos limites operacionais normais. De acordo com Chaudhry (2014), o estresse adicional reduz significativamente a vida útil dos equipamentos, levando a quebras inesperadas e aumento dos custos de manutenção.

3.3 Estruturas de proteção

Diversas estruturas podem ser adotadas para reduzir os impactos do golpe de aríete, as quais devem levar em consideração a fase de vida do sistema (viabilidade, projeto, operação), o orçamento disponível, a mão-de-obra e o impacto esperado. Alguns dispositivos de proteção do transiente hidráulico são:

3.3.1 Ventosas

As ventosas (Figura 1), têm como principais funções permitir a entrada e saída de ar durante o enchimento ou esvaziamento de tubulações, além de expulsar o ar liberado durante o funcionamento normal do sistema, evitando o acúmulo de bolsas de ar nos pontos altos da instalação, o que poderia causar riscos operacionais. Essas válvulas também atuam para prevenir quedas de pressão durante regimes transitórios (AQUINO, 2013).

Existem diferentes tipos de ventosas, como as ventosas compactas, que desempenha as mesmas funções que a ventosa simples tradicional, mas se destaca por ter uma menor massa, o que a torna uma opção vantajosa para aplicações em instalações prediais ou em redes de menor porte. Além disso, há a ventosa de tríplex função, composta por dois compartimentos internos, cada um contendo um flutuador esférico. Este tipo de ventosa é projetado para expulsar o ar deslocado pela água durante o enchimento da tubulação, admitir ar suficiente durante o esvaziamento, e expelir automaticamente o ar acumulado enquanto a adutora está em operação. (FERNANDES, 2009).

As ventosas são geralmente instaladas nos pontos mais altos da tubulação, onde o ar tende a se acumular naturalmente, e em pontos de transição, como mudanças de inclinação ou de diâmetro, onde há uma maior probabilidade de formação de bolsões de ar. (TSUTIYA, 2006).

Figura 1 – Ventosa simples à esquerda, ventosa tríplice função à direita.



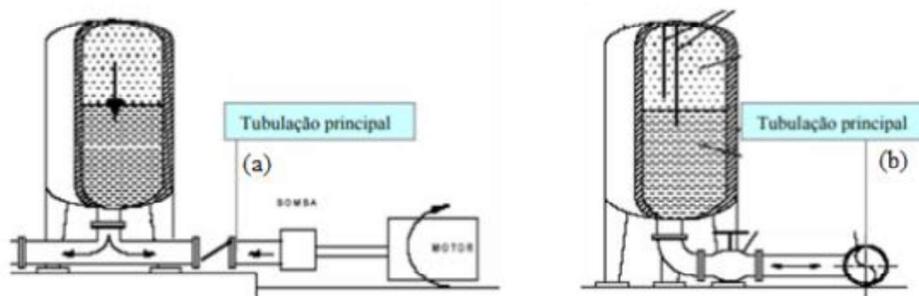
Fonte: A.R.I (2018)

3.3.2 Reservatório de ar comprimido ou hidropneumático (RHO)

Os Reservatórios Hidropneumáticos (RHO) (Figura 2), consistem em um tanque que contém água e ar comprimido interligado à adutora. Durante um evento de golpe de aríete tais dispositivos possibilitam a oscilação da massa de água entre este recipiente e o reservatório de descarga, com amortecimento, devido ao ar, evitando que ocorra neste trecho, variações elevadas de pressões. São dispositivos que protegem tanto contra aos acréscimos de pressão como os decréscimos. (SOUZA, 2008).

Os reservatórios hidropneumáticos são geralmente instalados próximos ou diretamente junto às estações elevatórias, onde podem exercer seu máximo efeito. Embora esse sistema apresente a desvantagem de ter um custo elevado e exigir uma manutenção mais complexa, sua utilização é vantajosa em muitos casos, pois é um dos métodos mais eficazes para o controle de transientes hidráulicos. (MASIERO JUNIOR, 2008).

Figura 2 – Representação de um reservatório hidropneumático.

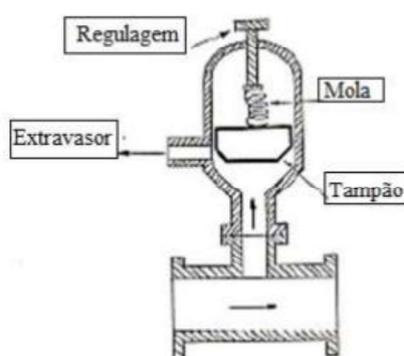


Fonte: Souza (2008).

3.3.3 Válvulas de alívio

As válvulas de alívio (Figura 3), são especialmente importantes em sistemas de adução de água devido à sua capacidade de resposta imediata. Elas são instaladas em pontos estratégicos ao longo da tubulação, onde a probabilidade de variações de pressão é maior e protegem o sistema contra sobrepressões ao abrirem-se automaticamente quando a pressão ultrapassa um limite predefinido. Esse mecanismo permite a liberação de água até que a pressão retorne a um nível seguro, momento em que as válvulas se fecham imediatamente, ajudando a estabilizar a pressão no sistema. (TOMAZ, 2010).

Figura 3 – Representação de uma válvula de alívio.



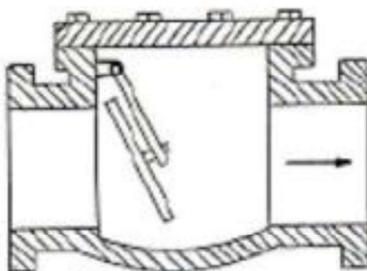
Fonte: Tomaz (2010).

3.3.4 Válvulas de retenção

As válvulas de retenção (Figura 4), são dispositivos posicionados na saída das bombas, as quais servem para impedir o retorno da água à bomba após sua paralisação. Essas válvulas

permitem que a água flua em apenas uma direção, prevenindo o fluxo inverso. Além disso, garantem que a tubulação permaneça cheia, evitando um novo preenchimento, o que é essencial para o controle do regime transiente. (MATTIELLO, 2017).

Figura 4 – Representação de uma válvula de retenção.



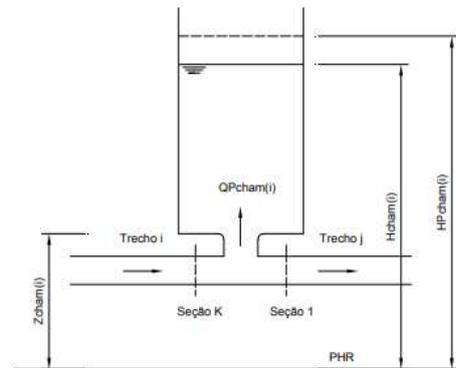
Fonte: Tomaz (2010).

3.3.5 Chaminé de equilíbrio

As chaminés de equilíbrio (Figura 5), são dispositivos utilizados para atenuar as elevadas pressões e depressões causadas pela interrupção abrupta do escoamento em uma tubulação. Há diversos tipos de chaminés de equilíbrio, como as simples, as de base estrangulada, as diferenciais e as de ar comprimido, cada uma com características específicas para controlar pressões de maneira eficiente conforme a necessidade do sistema. (MASIERO JUNIOR, 2008).

As chaminés de equilíbrio funcionam como reservatórios verticais conectados à tubulação principal, que permitem a movimentação livre da água em resposta às flutuações de pressão. Durante um evento de golpe de aríete, a água pode subir ou descer na chaminé, absorvendo a energia das ondas de pressão e mitigando os picos de pressão que podem danificar o sistema. (BOULOS *et. al*, 2005).

Figura 5 – Representação de uma chaminé de equilíbrio.

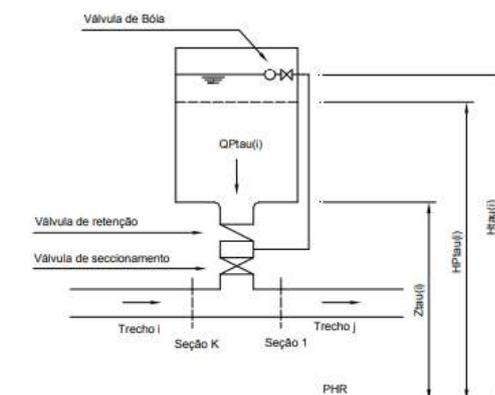


Fonte: Barbosa (2006).

3.3.6 Tanque alimentador unidirecional (TAU)

O Tanque Alimentador Unidirecional (TAU) (Figura 6) é usado para prevenir a ocorrência de baixas pressões e a separação da coluna d'água, permitindo a entrada de água na tubulação quando a pressão cai abaixo da cota piezométrica estabelecida. Geralmente, é instalado em locais elevados e convexos ao longo da linha de recalque, sendo isolado dos condutos principais por dutos laterais equipados com válvulas de retenção. Essas válvulas garantem que o fluxo ocorra apenas para o interior da adutora ou de condutos semelhantes, podendo abrir ou fechar conforme necessário. Embora, os TAUs sejam tipicamente localizados nos pontos mais altos do sistema, sua instalação não se limita a essas áreas. Contudo, eles não são eficazes na atenuação de picos de pressão máxima. (JUNIOR, 2008).

Figura 6 – Representação de um TAU.

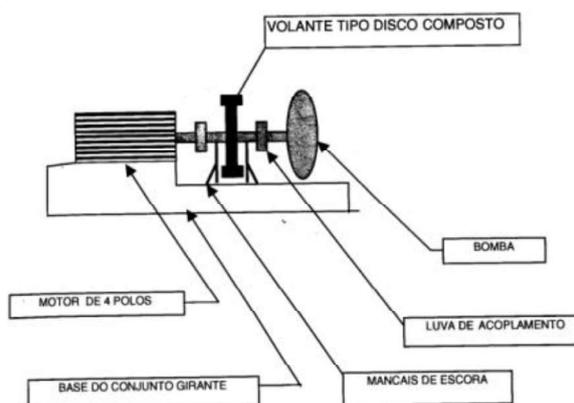


Fonte: Barbosa (2006).

3.3.7 Volante de inércia

Os volantes de inércia (Figura 7), desempenham um papel importante na atenuação das depressões decorrentes do golpe de aríete, influenciando diretamente o tempo de parada do sistema. Quando acoplados ao grupo motobomba, sua inércia reduz a perda de rotações, prolongando o tempo de desaceleração do conjunto. Esse aumento no tempo de parada resulta em uma menor intensidade do golpe de aríete. Apesar de não atuarem diretamente sobre as sobrepressões, os volantes de inércia contribuem para sua mitigação ao diminuir as depressões máximas, promovendo maior estabilidade ao sistema (CAMPARGO, 1989).

Figura 7 – Representação de volante de inércia.



Fonte: Tomaz (2010).

3.4 NBR 12215 – Projeto de Adutora de Água para Abastecimento Público

A NBR 12215 de 1991 estabelece bases para a análise do golpe de aríete em projetos de adutoras de água para abastecimento público, com o intuito de garantir a integridade do sistema diante das pressões transitórias geradas por variações abruptas no escoamento de água. (ABNT NBR 12215/1991).

De acordo com a norma, é necessário realizar uma análise do golpe de aríete em novas adutoras ou em instalações existentes que sofram modificações na pressão, vazão ou nas condições de operação. A análise deve considerar tanto condições normais quanto condições excepcionais de operação. Entre as condições normais em uma adutora de recalque destacam-

se o funcionamento adequado dos dispositivos de proteção, a interrupção súbita do bombeamento e as manobras de válvulas. Já as condições excepcionais incluem falhas nos dispositivos de proteção, fechamento inadequado de válvulas, ruptura da adutora na secção de pressão máxima de regime permanente e fechamento retardado das válvulas de retenção. (ABNT NBR 12215/1991).

As pressões máximas devidas ao golpe de aríete ocorrentes em qualquer secção da adutora, devem estar abaixo ou iguais à pressão admissível dos componentes, assegurando que tanto tubulações quanto conexões e acessórios estejam em conformidade com os planos de carga piezométrica de regime permanente. Para tubulações metálicas de parede fina, a pressão admissível é calculada com base na tensão admissível e na espessura e diâmetro da tubulação, conforme as equações 3 e 4:

$$P_{adm} = \frac{2e\sigma_{adm}}{D}, \quad (3)$$

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{esc}}{2} \quad (4)$$

Onde:

- P_{adm} = Pressão admissível, em Pa;
- σ_{adm} = Tensão admissível, em Pa;
- σ_{esc} = Tensão de escoamento do material, em Pa;
- e = Espessura da parede da tubulação, em mm;
- D = Diâmetro da tubulação, em mm.

Esse valor pode ser ajustado em condições excepcionais, aumentando em até 1,5 vezes o valor normal de trabalho para permitir uma margem extra de segurança. (ABNT NBR 12215/1991).

Nas condições de pressão mínima, a norma estipula que os valores não devem cair abaixo da pressão subatmosférica admissível. Para tubulações de parede fina, essa pressão mínima é definida pela pressão de colapso estrutural da tubulação, garantindo que mesmo sob pressão negativa o sistema mantenha sua integridade estrutural.

A NBR 12215 (1991) recomenda que a análise do golpe de aríete em adutoras seja realizada em duas etapas, começando pelo diagnóstico inicial, seguido pelo dimensionamento dos dispositivos de proteção, caso necessário. Na fase de diagnóstico, busca-se identificar e calcular as pressões no golpe de aríete que ocorrem na adutora em condições normais e excepcionais, sem a presença de dispositivos de proteção. Essa análise inicial permite que os projetistas compreendam o comportamento do sistema sob diferentes cenários operacionais e avaliem os riscos associados às variações bruscas de pressão típicas do golpe de aríete. O diagnóstico deve verificar se as variações de pressões atendem aos limites de pressão máximos e mínimos estipulados pela norma; caso esses limites sejam respeitados, a instalação de dispositivos de proteção pode ser dispensada. No entanto, se as pressões excederem os limites, inicia-se a segunda etapa, que envolve o dimensionamento e a escolha de dispositivos de proteção que assegurem que as pressões máximas e mínimas estejam dentro dos limites seguros, promovendo o uso eficaz de recursos e minimizando custos de implantação e operação

Por fim a norma recomenda o uso de dispositivos de proteção, para minimizar os impactos dos picos de pressão. O cálculo do golpe de aríete deve ser realizado pelo método das características, incluindo uma avaliação da celeridade da onda de pressão, calculada com base nas propriedades do material. Esse cálculo ajuda a prever os picos de pressão e a projetar proteções eficazes para garantir que as pressões transitórias fiquem dentro dos limites seguros para a integridade estrutural do sistema

3.5 Programa ALLIEVI

O programa ALLIEVI desenvolvido pela Universidade Politécnica de Valência, na Espanha, é um programa que possibilita condições para analisar e verificar os efeitos transitórios de manobras efetuadas nos elementos do sistema hidráulico. O programa permite analisar o escoamento em redes hidráulicas de condutos forçados alimentadas por vários reservatórios, com várias estações de bombeamento, e com o escoamento regulado por estações de válvulas formando redes malhadas, ramificadas ou mista. (ITA-UPV, 2010).

ALLIEVI é um programa de cálculo que pode ser utilizado tanto na fase de concepção de um projeto como na fase de verificação da operação de um sistema hidráulico. O programa permite realizar a simulação de vários dispositivos de proteção como tanques alimentadores unidirecionais, chaminés de equilíbrio, válvulas de alívio etc. de modo que as mudanças de

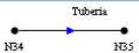
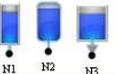
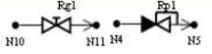
pressões geradas por manobras nos componentes do sistema, sejam mantidas entre limites predeterminados. Deste modo o ALLIEVI permite diagnosticar e visualizar os efeitos transitórios na operação do sistema ao simular várias manobras numa instalação já projetada. (ITA-UPV, 2010).

A determinação das pressões nas tubulações é realizada por meio do método das características, que permite calcular as envoltórias de pressão. Vale destacar que os resultados são limitados pelas condições de contorno especificadas no software, como reservatórios, estações de bombeamento, válvulas e outros dispositivos instalados. (ITA-UPV, 2010).

Por meio de elementos que se conectam através de nós, é possível realizar a simulação do sistema hidráulico existente. Normalmente, cada elemento tem dois nós: um inicial e um final, com o sentido do escoamento estabelecido do nó inicial para o nó final. A simulação, é possível após inserir as características do objeto de estudo no programa, utilizando estes elementos disponíveis. Cada elemento possui especificações que devem ser preenchidas com base nas informações previamente obtidas do objeto de estudo. (ITA-UPV, 2010).

A figura 8, ilustra os tipos de elementos disponíveis e suas representações gráficas no programa.

Figura 8 – Representações dos elementos no ALLIEVI.

Tipos de Elemento	Representação Gráfica no ALLIEVI
1. Nós	
2. Reservatórios	 N16 N17
3. Tubulações	 Tuberia N84 N85
4. Estações de bombeamento	 Bomba N80 N81
5. Estruturas de Proteção	 N1 N2 N3
6. Estruturas de controle de vazão	 Fg1 Ep1 N10 N11 N4 N5
7. Leis de Vazão (Q) ou de carga (H)	 N12 N13
8. Turbinas Francis	 Tb2 N43 N44
9. Condutos livres (canais)	 Canal N14 N15

Fonte: ITA-UPV (2010).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Caracterização do sistema de captação

A adutora analisada foi a adutora de água bruta do sistema de captação de água da represa Capim Branco (Figura 9), o qual está situado na bacia hidrográfica do rio Araguari. Tal sistema tem a pretensão de atender a demanda futura de $2,5 \times 10^6$ habitantes a partir da captação e tratamento de uma vazão de $6,0 \text{ m}^3/\text{s}$. (DMAE, 2014).

O sistema de captação de água bruta é composto por:

- Estação Elevatória de Água bruta (EEAB);
- Adutora de 4.582,16 m de extensão e 1100mm de diâmetro;
- Dois tanques de alimentação unidirecional (TAUs) ligados à adutora;
- Reservatório hidropneumático ligado à adutora;
- Duas ventosas ligadas à adutora.

Figura 9 – Sistema de captação.



Fonte: Prefeitura de Uberlândia.

A Estação Elevatória de Água Bruta contém uma casa de bombas (Figura 10), com cinco motobombas, sendo uma de reserva, instaladas em paralelo, as quais são responsáveis pelo recalque da água do poço de sucção para a ETA. Segundo o site oficial da Prefeitura de

Uberlândia (2021), o sistema conta com capacidade de 2000 l/s. Elas foram desenvolvidas especialmente para este sistema com potência de 1,5 mil CV, peso aproximado de 14 t e capacidade de bombeamento de 500 l/s, cada.

Figura 10 – Casa de bombas da EEAB.



Fonte: DMAE.

O barrilete de recalque é formado por tubulações de aço de 600 mm, que ligam à adutora de 1100 mm de diâmetro, de aço, com uma extensão total de 4.582,16 m, porém dividida em três espessuras diferentes de 5/16”, 5/8” e 1/2”. Ao longo da adutora, estão instalados dispositivos para controle da pressão interna, como um reservatório hidropneumático, tanques de alimentação unidirecional e ventosas, conforme resumido no quadro 1.

Quadro 1 - Características da adutora

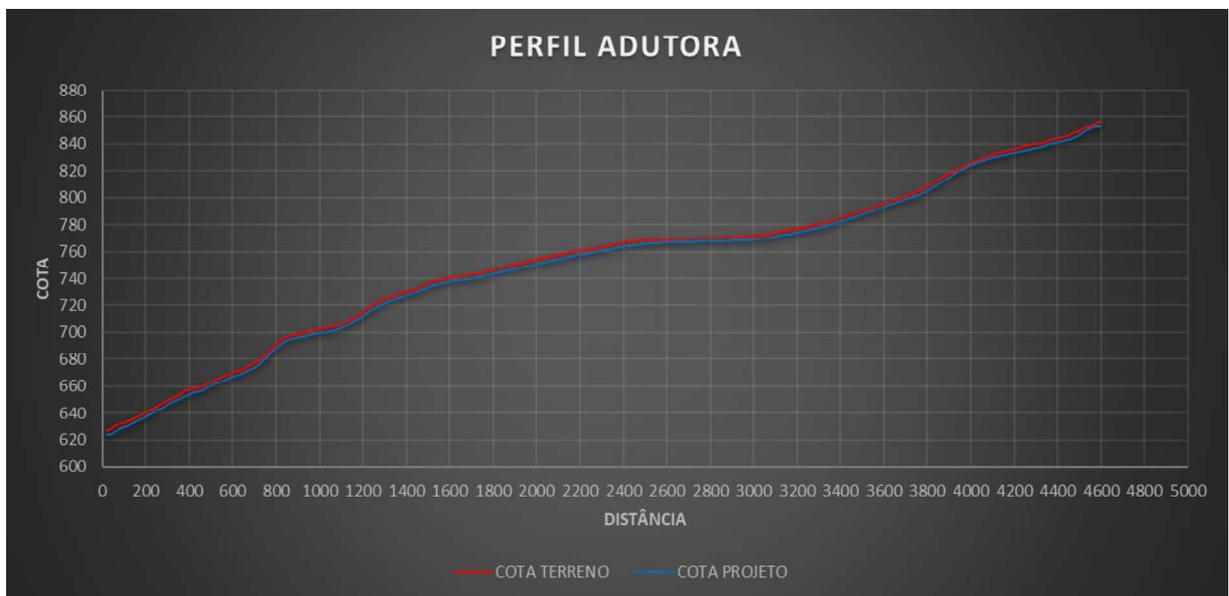
ADUTORA	
Extensão total	4.582,16 m
Material	Aço
Diâmetro	1100 mm
Espessura	2.106,23 m, esp. 5/16”
	980,62 m, esp. 5/8”
	1.495,31 m, esp. 1/2”

Dispositivos instalados	01 - Tanque hidropneumático; 02 - Tanques de alimentação unidirecional; 02 - Ventosas
-------------------------	---

Fonte: Autor (2024).

A figura 11 representa o perfil da adutora e do terreno, estaqueados a cada 20,00m com dados obtidos pelo DMAE.

Figura 11 - Perfil da adutora e do terreno.



Fonte: Autor (2024).

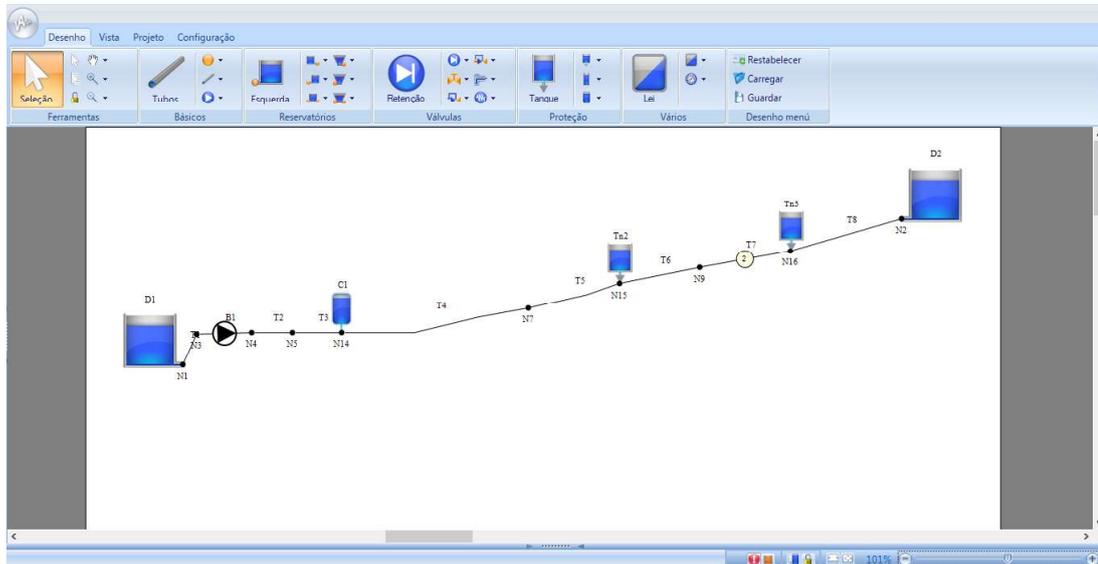
4.2 Aplicação do sistema no *software* ALLIEVI

Para a simulação hidráulica do regime transiente, a adutora foi modelada utilizando o programa ALLIEVI, com os dados fornecidos pelo Departamento Municipal de Água e Esgotos (DMAE). A seguir, apresenta-se o detalhamento dos passos envolvidos na construção do cenário da adutora no *software* onde foi utilizado os seguintes elementos:

- Reservatórios
- Tubulações
- Estação de bombeamento
- Reservatório hidropneumático
- Tanque de alimentação unidirecional

A figura 12 apresenta o modelo esquemático da adutora, objeto deste estudo, no programa ALLIEVI.

Figura 12 – Topologia geral da simulação.



Fonte: Autor (2024).

4.2.1 Reservatórios

O ALLIEVI permite modelar diversos tipos de reservatórios, incluindo Grandes Dimensões (GD)/nível constante, Pequenas Dimensões (PD)/nível variável, Secção Variável (SV) e reservatórios com Divisão e Vertedor (DV). Para esta simulação, foram utilizados dois reservatórios sendo o primeiro a representação da represa de Capim Branco e o segundo à chegada a ETA, onde optou-se pela escolha de reservatórios de grandes dimensões indicando que não há variações de nível.

Figura 13 – Dados do Reservatório 1.

Reserv. - Dados Básicos							
Nome	Ni	Nf	Zs (m)	Tipo	S (m ²)	Z0 (m)	Zvar
D1	---	N1	620,8	GD		623,64	

Fonte: Autor (2024).

Foram inseridas as informações reais de cota e altura da água de acordo com os dados obtidos, sendo Zs a cota da soleira e Z0 a cota inicial da água.

4.2.2 Tubulações

As tubulações no programa têm como dados de entrada, os seguintes parâmetros:

- Diâmetro interno (Dint);
- Comprimento (L);
- Espessura da tubulação (e);
- Rugosidade absoluta;
- Coeficiente de perdas singulares (k);
- Celeridade (a);
- Traçado da tubulação (Perfil).

Para melhor representação do sistema real existente, as tubulações foram divididas em 7 trechos:

TRECHO 1

O trecho 1 (T1) representa a tubulação de sucção na qual foi utilizado um tubo de aço com DN 500, espessura igual a 7,94mm, rugosidade equivalente a 0,05 mm na cota 620,80 para 626,51 em uma distância de 5,71m. A celeridade foi calculada pelo programa como mostrado na figura 14, este mesmo cálculo foi feito nos próximos trechos.

Figura 14 – Cálculo da celeridade.

Cálculo celeridade da tubulação T1

Cálculo da celeridade da tubulação selecionada

Permite atribuir um valor para a celeridade ou calculá-lo mediante a introdução de três parâmetros

Especificar celeridade

Celeridade (m/s)

Calcular celeridade

Diâmetro (mm)

Espessura (mm)

Coef. material

Celeridade (m/s)

Coefficientes do material da tubulação

Coefficiente: CMT = 1.0E+6/ModElastTub(Kp/cm2)

Aço:..... 0.5 MET = (2.0 - 2.12)E+6 Kp/cm2

Fo.Fo.:..... 0.6 - 1.3 MET = (0.80 - 1.70)E+6 Kp/cm2

Concreto:..... 3.3 - 7.1 MET = (0.14 - 0.30)E+6 Kp/cm2

H. arm. camisa chapa:.. 2.5 MET = 0.39E+6 Kp/cm2

PVC Rígido:..... 36 - 42 MET = (2.40 - 2.75)E+4 Kp/cm2

Salvar Cancelar

Fonte: Autor (2024).

A figura 15 representa as características do trecho 1 que também foram preenchidas nos demais trechos.

Figura 15 – Dados do trecho 1.

Tubos - Dados Básicos										Perdas	
Nome	Ni	Zi (m)	Nf	Zf (m)	Dint (mm)	L (m)	e (mm)	a (m/s)	Perfil	Rug (mm)	k
T1	N1	620,8	N3	626,51	500	5,71	5,54	1028,0958	Calc.	0,05	2,5

Fonte: Autor (2024).

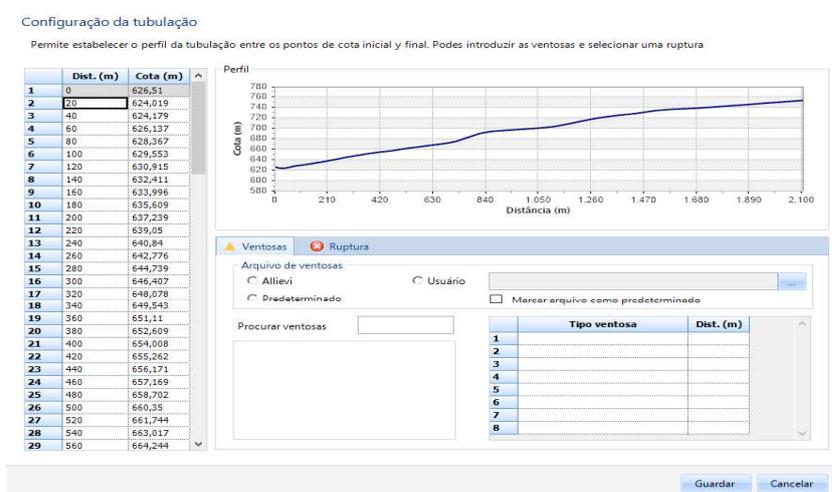
TRECHO 2

No segundo trecho ocorre o aumento de diâmetro da adutora que caracteriza como o fim da estação de bombeamento. A tubulação de aço passa a ter um diâmetro de 1100 mm, espessura igual a 7,94mm, rugosidade equivalente a 0,05 mm e um comprimento de 5,3m até o tanque hidropneumático.

TRECHO 3

O terceiro trecho é o último antes da mudança de espessura da tubulação, desta forma ele mantém as dimensões de diâmetro, espessura e rugosidade do trecho anterior. Porém, por se tratar de um trecho longo com 2.105 m, foi informado o traçado da tubulação com base nas informações definidas pelo DMAE com estacas de 20 a 20 metros, representado na figura 16.

Figura 16 – Perfil do trecho 3.

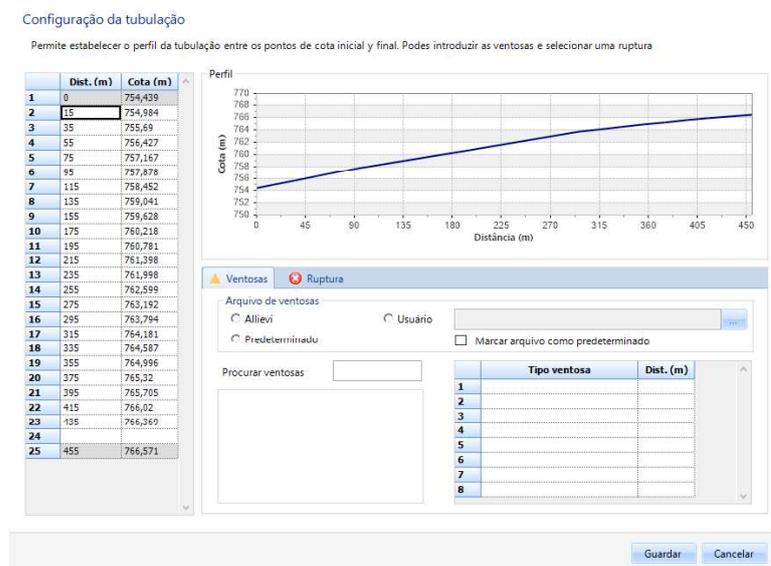


Fonte: Autor (2024).

TRECHOS 4 e 5

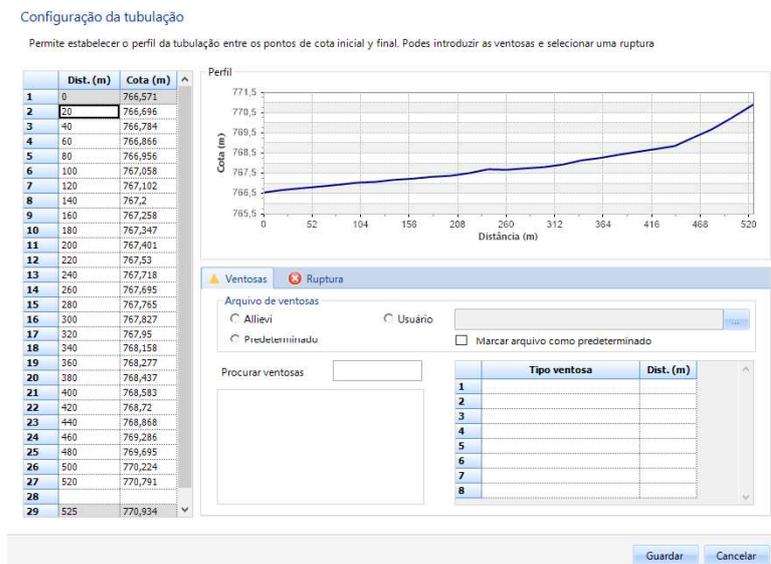
Nestes percursos foram feitas a alteração da espessura das tubulações, passando a ser de 15,88mm e se manteve as demais características anteriores com comprimento de 754,44 m e 766,57 m respectivamente. Devido aos longos comprimentos, foram informados seus respectivos perfis no ALLIEVI ilustrados nas figuras 17 e 18 respectivamente.

Figura 17 – Perfil do trecho 4.



Fonte: Autor (2024).

Figura 18 – Perfil do trecho 5.

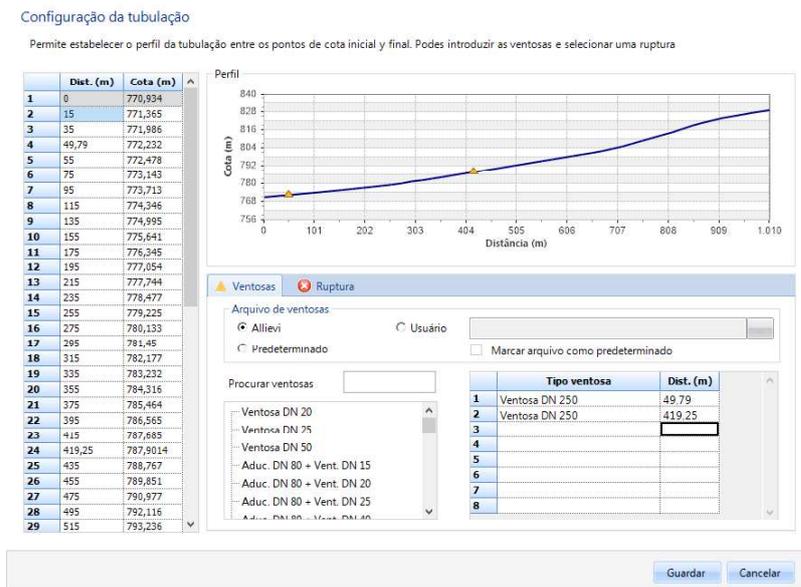


Fonte: Autor (2024).

TRECHO 6 E 7

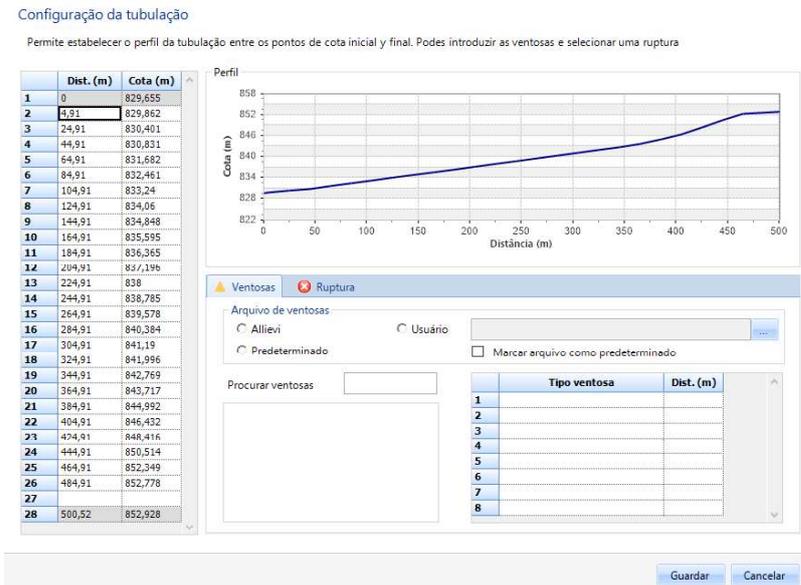
Nos últimos trechos da adutora antes de chegar a ETA é feito novamente uma mudança de espessura da tubulação alterando para 12,7 mm e mantendo as demais características. Porém no trecho 6 foram instaladas duas ventosas conforme mostrado na figura 19. O ALLIEVI possui internamente uma base de dados com características de ventosas que foram utilizadas para a simulação.

Figura 19 – Perfil trecho 6.



Fonte: Autor (2024).

Figura 20 – Perfil trecho 7.



Fonte: Autor (2024).

A figura 21 exibe todos os trechos presentes no software e seus respectivos dados.

Figura 21 – Resumo dos trechos.

Tubos - Dados Básicos										Perdas	
Nome	Ni	Zi (m)	Nf	Zf (m)	Dint (mm)	L (m)	e (mm)	a (m/s)		Perfil	Rug (mm)
T1	N1	620,8	N3	626,51	500	5,8	7,94	1113,2302	Calc.	----	0,05
T2	N5	626,51	N14	626,51	1100	12	7,94	915,7661	Calc.	----	0,05
T3	N14	626,51	N7	754,439	1100	2105	7,94	915,7661	Calc.	-^/^-/	0,05
T4	N7	754,439	N15	768,05	1100	455	15,88	1091,7105	Calc.	-^/^-/	0,05
T5	N15	768,05	N9	770,934	1100	525	15,88	1091,7105	Calc.	-^/^-/	0,05
T6	N9	770,934	N16	830,41	1100	1010,09	12,7	1038,3322	Calc.	-^/^-/	0,05
T7	N16	830,41	N2	852,928	1100	500,52	12,7	1038,3322	Calc.	-^/^-/	0,05

Fonte: Autor (2024).

4.2.3 Estação de bombeamento

As características gerais das estações de bombeamento a serem inseridas são as seguintes:

- Número de bombas em paralelo;
- Forma das curvas características das bombas;
- Tipo de válvula;
- Inércia de cada grupo;
- Velocidade de rotação nominal;
- Funcionamento inicial das bombas.

O ALLIEVI proporciona ao usuário a opção de calcular a inércia utilizando os dados do ponto ótimo de funcionamento da bomba.

Conforme informado anteriormente a estação de bombeamento construída para o funcionamento da AAB conta com um sistema com capacidade de 2000 l/s com um conjunto de 5 motobombas sendo uma de reserva com capacidade de bombeamento de 500 l/s, cada. Porém foi simulado apenas uma bomba em funcionamento com uma vazão de 400 l/s, resultando em 80% da sua capacidade, conforme ilustrado na figura 22.

Figura 22 – Dados da estação de bombeamento.

Estação de bombas - Dados Básicos						
	Nome	Ni	Nf	Z (m)	Num	Curva
<input type="checkbox"/>	B1	N3	N5	626,51	1	Universais
Rendimento ótimo						
	Q (l/s)	H (m)	P (Kw)	Rend(%)		
	400	265	1100,032	94,53		

Fonte: Autor (2024).

4.2.4 Reservatório hidropneumático

Em virtude da falta de dados disponibilizados pelo DMAE sobre o reservatório hidropneumático, foi feito o pré-dimensionamento dele utilizando o próprio programa. O ALLIEVI possibilita o pré-dimensionamento de reservatórios hidropneumáticos em sistemas que envolvem ou são comparáveis ao bombeamento entre reservatórios através de uma única tubulação.

Para realizar o pré-dimensionamento, é necessário conhecer o número de reservatórios a instalar, o diâmetro da tubulação de impulsão e os coeficientes de perdas do ramal de união. Foi adotado um RHO e os coeficientes de perdas foram calculados pelo *software*, representado na figura 23:

Figura 23 – Cálculo dos coeficientes de perdas do ramal de união.

Calcular coeficientes de perdas do calderín C1

Cálculo dos coeficientes de perdas de saída e entrada ao calderín

O assistente permite o cálculo dos coeficientes de perdas do calderín selecionado

Número de calderíns:

Diâmetro do ramal de união: mm

Com by-pass

Diâmetro do by-pass: mm

Sem dissipador

K de saída do calderín: $m/(m^3/s)^2$

K de entrada ao calderín: $m/(m^3/s)^2$

[Assistente avançado](#)

Cancelar << >> Terminar

Fonte: Autor (2024).

Com os valores dos coeficientes de perdas do ramal de união obtidos, foi então realizado o pré-dimensionamento conforme a figura 24, no qual foi obtido um reservatório hidropneumático com um volume de 27,46m³ e dimensões de diâmetro e comprimento igual a 2,41 m e 6,02 m respectivamente.

Figura 24 – Pré-dimensionamento do reservatório hidropneumático.

Calcular volume do calderin C1

Cálculo do volume do calderin

O assistente permite predimensionar o calderin selecionado

Núm. calderins	1	K de saída	2,599	m/(m ³ /s) ²			
		K de entrada	3,8022	m/(m ³ /s) ²			
Diâmetro tubulação	1100,0	mm	Velocidade	0,42	m/s		
Vazão	400,0	l/s	Altura de bombeame	243,87	m		
Caso de cálculo: H máxima junto a bomba		Máxima sobrepressão	100	m			
Vol. total inicial gás	17,53	m ³	Vol. total calderins	27,46	m ³		
Predimensionado da cada calderin							
Diâmetro	2,41	2,41	m	Volume inicial gás	17,53	17,53	m ³
Comprimento	6,02	6,02	m	Pressão de inchado	14,9	14,9	bar
Volume	27,46	27,46	m ³	Dimensões calderins			

Cancelar << >> Terminar

Fonte: Autor (2024).

4.2.4 Tanques de alimentação unidirecional

Para a inserção dos TAU-01 no programa, foram informados os seguintes dados de entradas obtidos por meio do DMAE:

- Diâmetro interior do tanque unidirecional de seção circular constante
- Cota da base ou soleira do tanque unidirecional.
- Rugosidade absoluta das paredes interiores do tanque unidirecional.
- Altura máxima da água no tanque unidirecional em relação à base ou soleira do tanque.
- Diâmetro interior do ramal de união.
- Comprimento do ramal de união.
- Rugosidade absoluta das paredes interiores do ramal de união.
- Coeficiente de perdas singulares para o fluxo de saída do tanque unidirecional (Ks).

O K_s depende das características do ramal e dos acessórios instalados no mesmo. O valor do coeficiente pode ser introduzido diretamente ou calculado pelo programa, conforme indicado na figura 25:

Figura 25 – Cálculo do K_s .

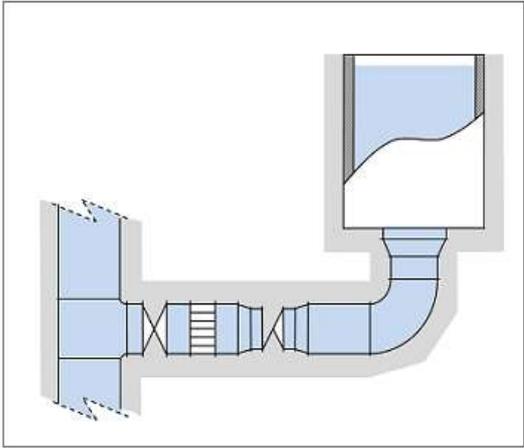
Cálculo do coeficiente de perdas para o fluxo de saída do tanque unidirecional

O assistente permite o cálculo do coeficiente de perdas menores do tanque unidirecional seleccionado

Diâmetro tubulação de impulsão	1100	mm
Diâmetro ramal de união	600	mm
Diâmetro válvula de retenção	600	mm
Diâmetro orifício tanque unidirecional	600	mm
Diâmetro tanque unidirecional	2	m

K do saída do tanque: 2,8381 $m/(m^3/s)^2$

[Assistente avançado](#)



Fonte: Autor (2024).

Os tanques de alimentação unidirecional presentes na adutora designados como TAU-01 e TAU-02, foram implementados no software nas estacas 128 e 204+15,09 respectivamente. Devido à falta de dados referentes ao TAU-02, foram considerados os mesmos valores referentes ao TAU-01, porém, modificados conforme sua cota de origem. Deste modo a figura 26 representa as características dos TAUs inseridos no software ALLIEVI.

Figura 26 – Dados dos TAUs.

Tanque Unidirecional - Dados Básicos							Ramal de união					
Nome	Nó	Zu (m)	Act	D (m)	Rug (mm)	Zb (m)	Niv.max (m)	D (mm)	L (m)	Rug (mm)	K sal	Calc K
TAU-01	N15	768,05	<input checked="" type="checkbox"/>	2	0,03	766,8	780,05	600	6	0,03	2,8381	...
TAU-02	N16	830,41	<input checked="" type="checkbox"/>	2	0,03	829,16	842,41	600,0	6	0,03	2,8381	...

Fonte: Autor (2024).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O golpe de aríete foi calculado com a simulação da parada instantânea da bomba na estação elevatória de água bruta, depois de 100 s do início da simulação. Os resultados são apresentados em forma de envoltória das pressões composta pelas linhas de resultados apresentados para cada trecho das adutoras de recalque em:

- Regime Permanente;
- Máximo atingido no transiente;
- Mínimo atingido no transiente;
- Perfil do terreno;
- Linha limite de cavitação.

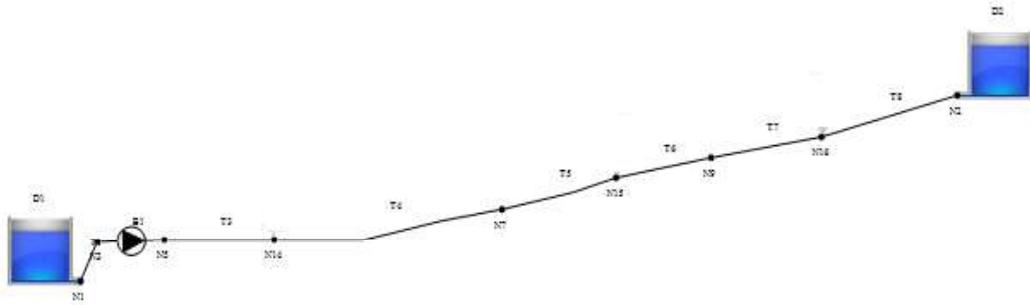
Para uma análise completa da adutora foram construídos diferentes cenários, com o objetivo de comparar as pressões logo após a estação elevatória de água bruta e em sua totalidade e fazer uma análise da eficácia dos diferentes dispositivos mitigadores presentes na adutora. Desta forma foram simulados os cenários descritos a seguir:

- CENÁRIO 1: Cálculo com interrupção súbita do bombeamento e sem nenhum dispositivo.
- CENÁRIO 2: Cálculo com interrupção súbita do bombeamento com a presença de ventosas.
- CENÁRIO 3: Cálculo com interrupção súbita do bombeamento com a presença do TAU-01.
- CENÁRIO 4: Cálculo com interrupção súbita do bombeamento com a presença do TAU-02.
- CENÁRIO 5: Cálculo com interrupção súbita do bombeamento com a presença do reservatório hidropneumático.
- CENÁRIO 6: Cálculo com interrupção súbita do bombeamento com a presença de todos os dispositivos de proteção.

5.1 Cenário 1

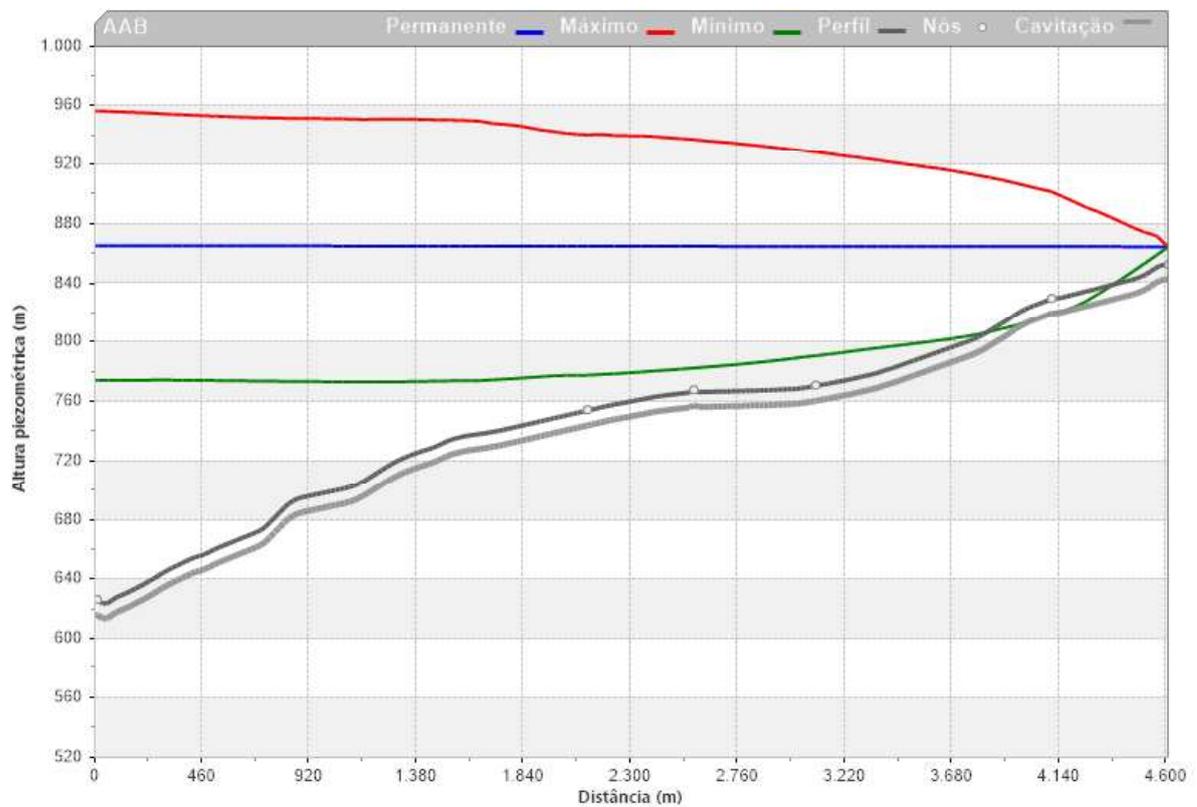
Neste cenário (Figura 27), foi simulado o golpe de aríete descrito anteriormente com a adutora desprovida de qualquer dispositivo de mitigação.

Figura 27 – Interface cenário 1.



Fonte: Autor (2024).

Figura 28 – Envoltória das alturas piezométricas, cenário 1.



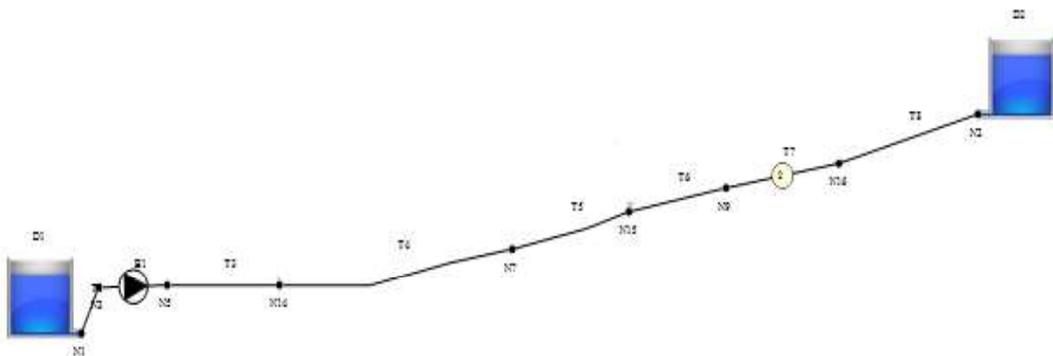
Fonte: Autor (2024).

Na figura 28, é possível observar pressões máximas logo após a estação elevatória de água bruta, alcançando valores de aproximadamente 331 mca. Com esse resultado, as pressões máximas da tubulação apresentaram um excedente de cerca de 38% em comparação com o regime permanente, que exerce uma pressão de aproximadamente 239 mca. Entretanto, o ponto crítico está relacionado às pressões mínimas, nas quais foram obtidos valores abaixo do limite de cavitação, representado pela linha tracejada cinza. A cavitação provoca a formação de vapor d'água, o que pode causar desgaste significativo na tubulação. Esse fenômeno está associado às chamadas pressões negativas e ocorre apenas na região final da adutora, onde se encontram as maiores altitudes. Esse comportamento sugere uma tendência contínua de degradação da adutora. Além disso, a grande variação de pressão entre os valores máximos e mínimos, que atinge cerca de 183 mca entre as ondas de alta e baixa pressão, pode gerar tensões nas conexões e em possíveis fissuras, contribuindo para vazamentos e comprometendo o desempenho do sistema.

5.2 Cenário 2

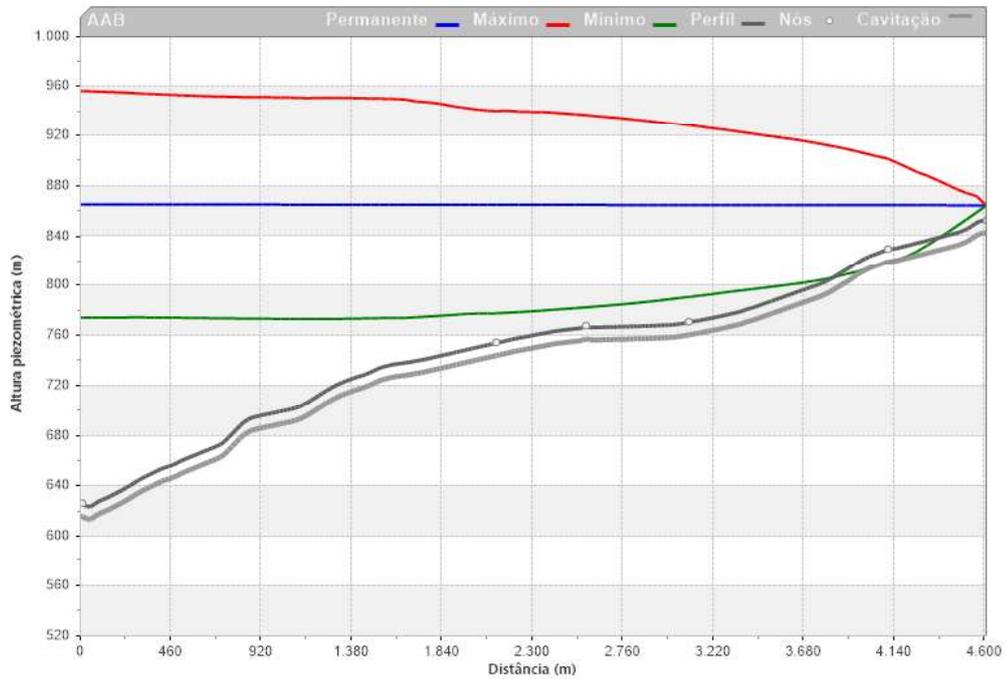
No segundo cenário foram introduzidas as duas ventosas presentes na adutora, nas estacas 156 + 14,79 e 175 + 4,25, conforme a figura 29.

Figura 29 – Interface cenário 2.



Fonte: Autor (2024).

Figura 30 – Envoltória das alturas piezométricas, cenário 2.



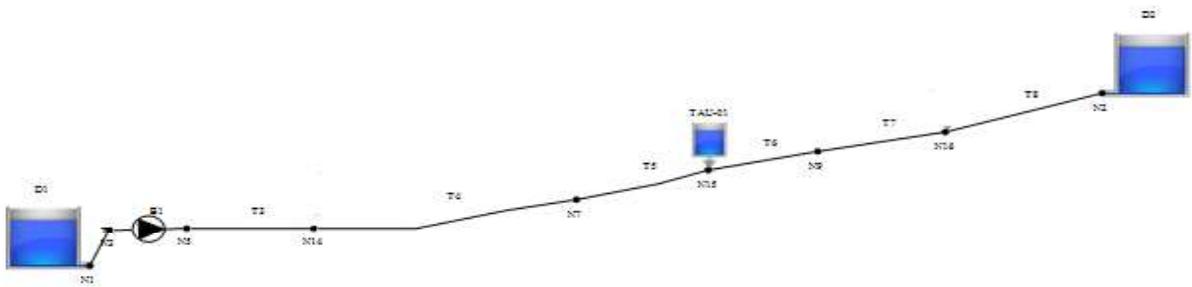
Fonte: Autor (2024).

Analisando a figura 30, não foi possível identificar nenhuma mudança significativa em comparação com a figura 28, na qual a adutora não possuía nenhum dispositivo. Portanto, as ventosas não apresentaram utilidade significativa no controle do transiente hidráulico nas condições simuladas neste trabalho.

5.3 Cenário 3

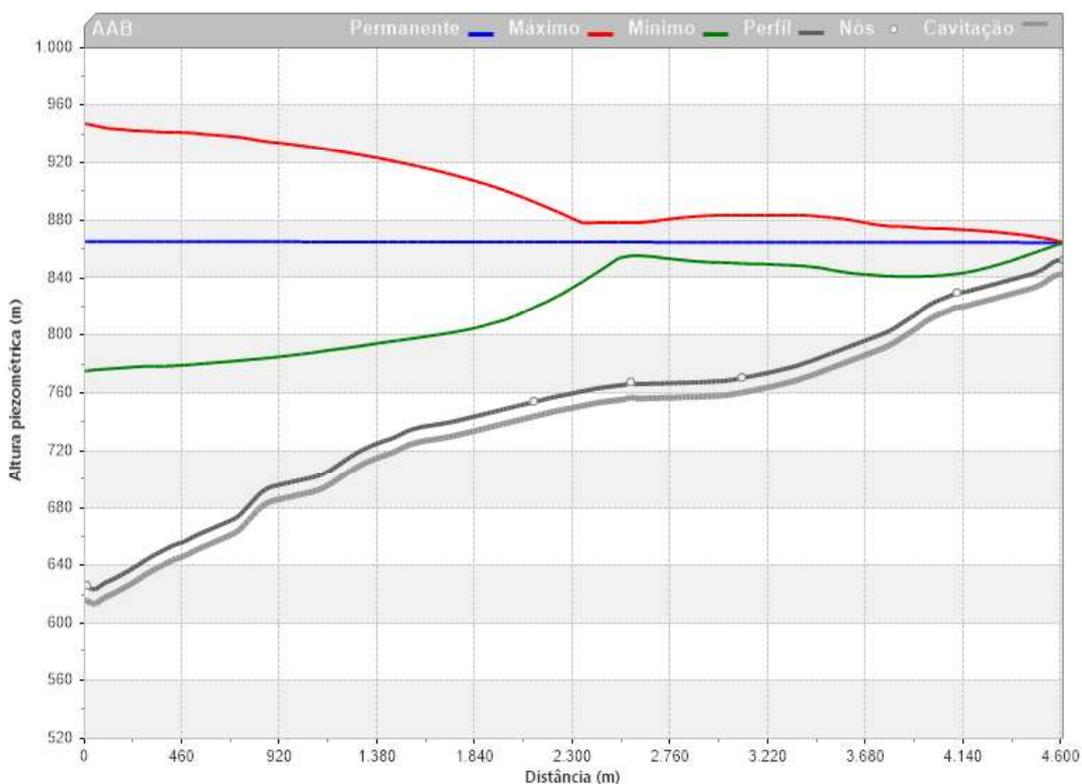
No terceiro cenário (Figura 31), o TAU-01 foi implementado na adutora.

Figura 31 – Interface cenário 3.



Fonte: Autor (2024).

Figura 32 – Envoltória das alturas piezométricas, cenário 3.



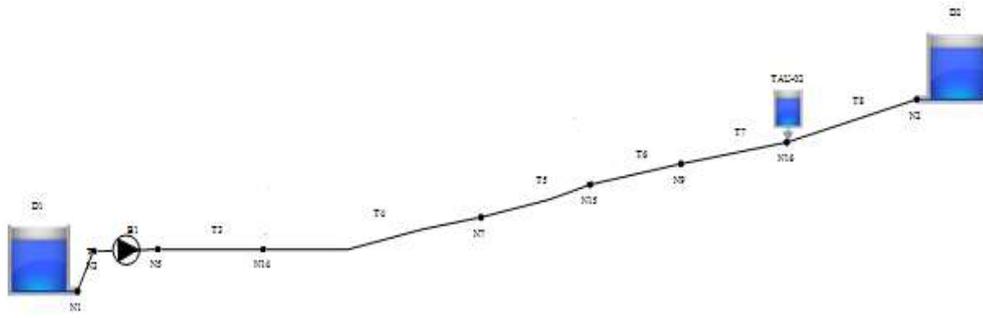
Fonte: Autor (2024).

A figura 32, demonstra que com a instalação do tanque de alimentação unidirecional a 2560 m da saída da linha, observou-se uma redução significativa nas variações das pressões máximas e mínimas após a passagem pelo tanque, aproximando as linhas piezométricas do comportamento observado em regime permanente. As pressões mínimas se distanciaram da linha de cavitação, eliminando, conseqüentemente, os riscos associados à formação de vapor e à possível separação de colunas. Contudo, as altas variações de pressão que ocorriam antes do TAU-01 foram mantidas.

5.4 Cenário 4

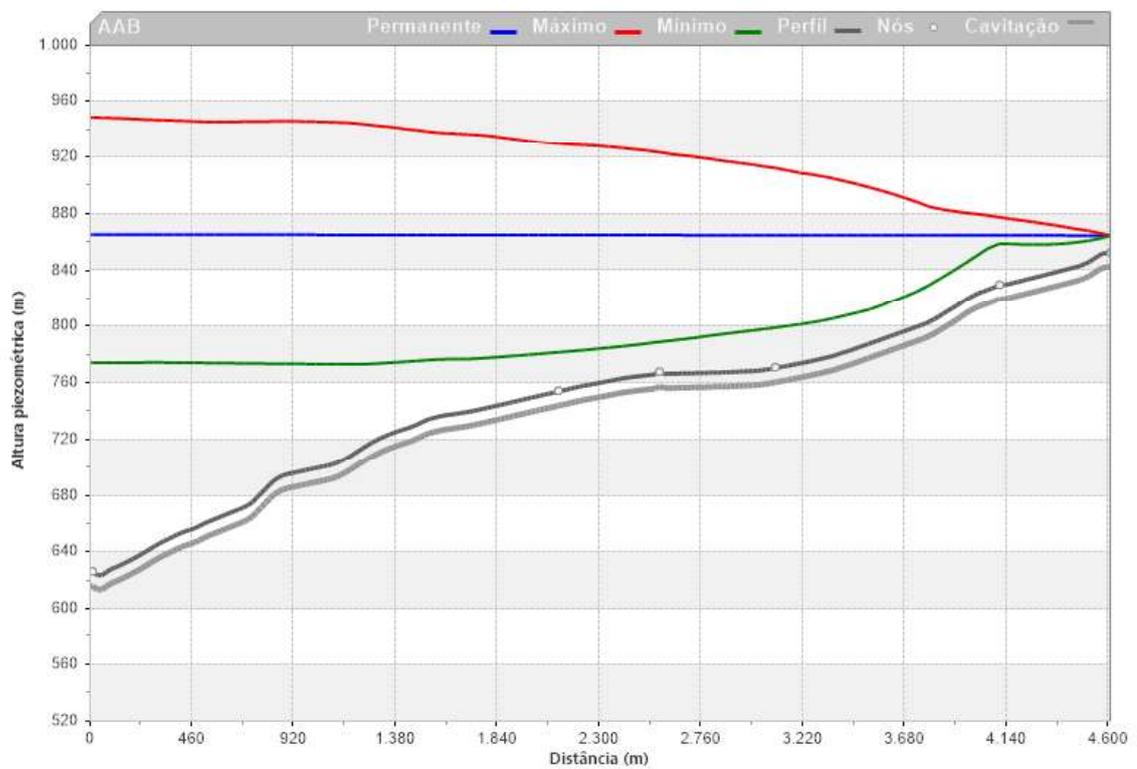
O TAU-02 na estaca 214-23 foi adicionado ao sistema neste cenário, conforme ilustrado na figura 33.

Figura 33 – Interface cenário 4.



Fonte: Autor (2024).

Figura 34 – Envoltória das alturas piezométricas, cenário 4.



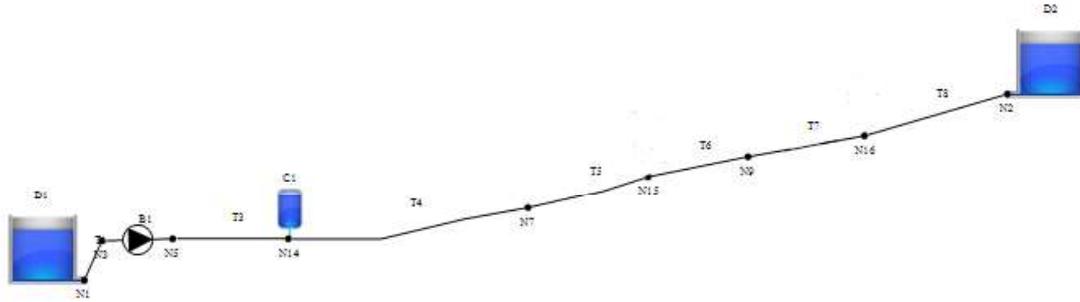
Fonte: Autor (2024).

Resultados semelhantes aos do cenário 3 foram observados na figura 34 em relação à mudança no comportamento das linhas piezométricas com a aproximação do TAU. Contudo, devido ao posicionamento do TAU no final da adutora, seus efeitos manifestaram-se mais tardiamente.

5.5 Cenário 5

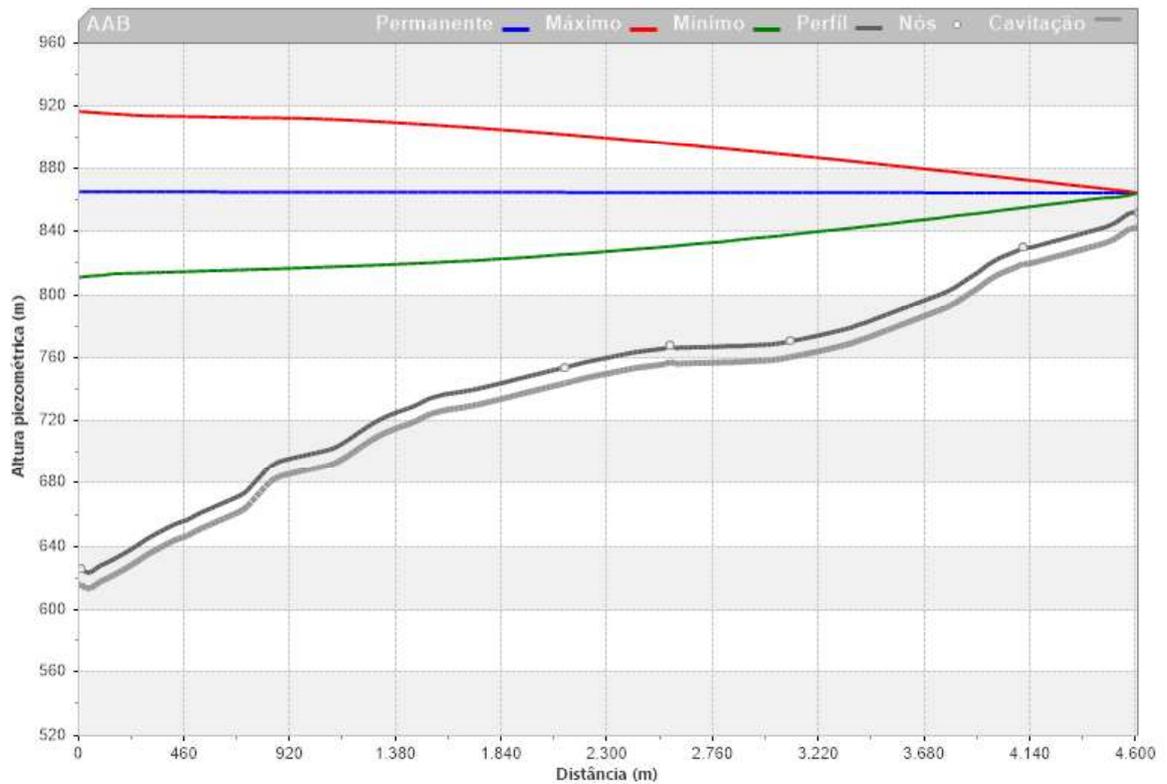
Neste cenário (Figura 35), foi adicionado o reservatório hidropneumático pré dimensionado pelo ALLIEVI.

Figura 35 – Interface cenário 5.



Fonte: Autor (2024).

Figura 36 – Envoltória das alturas piezométricas, cenário 5.



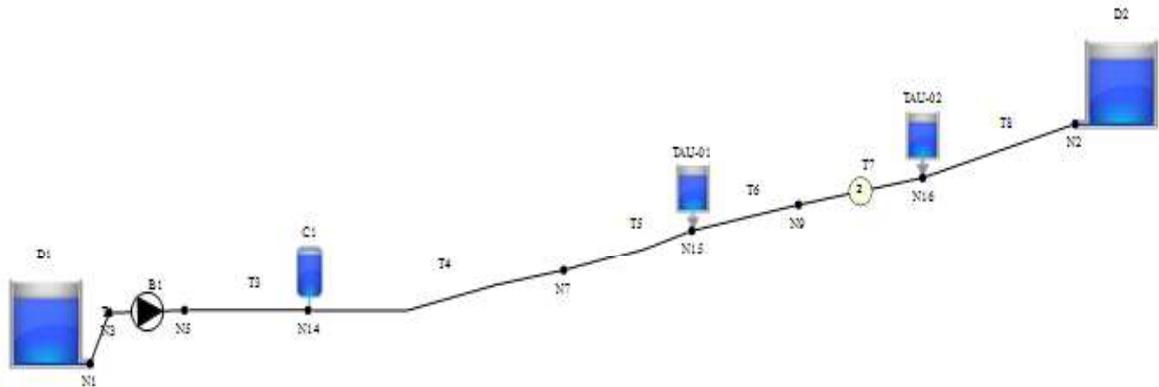
Fonte: Autor (2024).

A partir da análise dos resultados apresentados na figura 35, observa-se que o reservatório hidropneumático desempenha um papel eficaz no controle dos transientes ao longo de toda a adutora. As pressões máximas durante o transiente se aproximam das condições de regime permanente, passando de 331 mca para 290 mca, em comparação com a adutora desprovida de qualquer dispositivo de mitigação, o que representa uma redução de aproximadamente 14%. As pressões mínimas também se aproximaram das condições de regime permanente, eliminando o risco de cavitação. Entretanto, a variação de pressão foi o parâmetro mais impactado, diminuindo para cerca de 105 mca, o que equivale a uma redução de aproximadamente 43% em relação à adutora sem dispositivos. Esses resultados reforçam o maior controle dos transientes no sistema.

5.6 Cenário 6

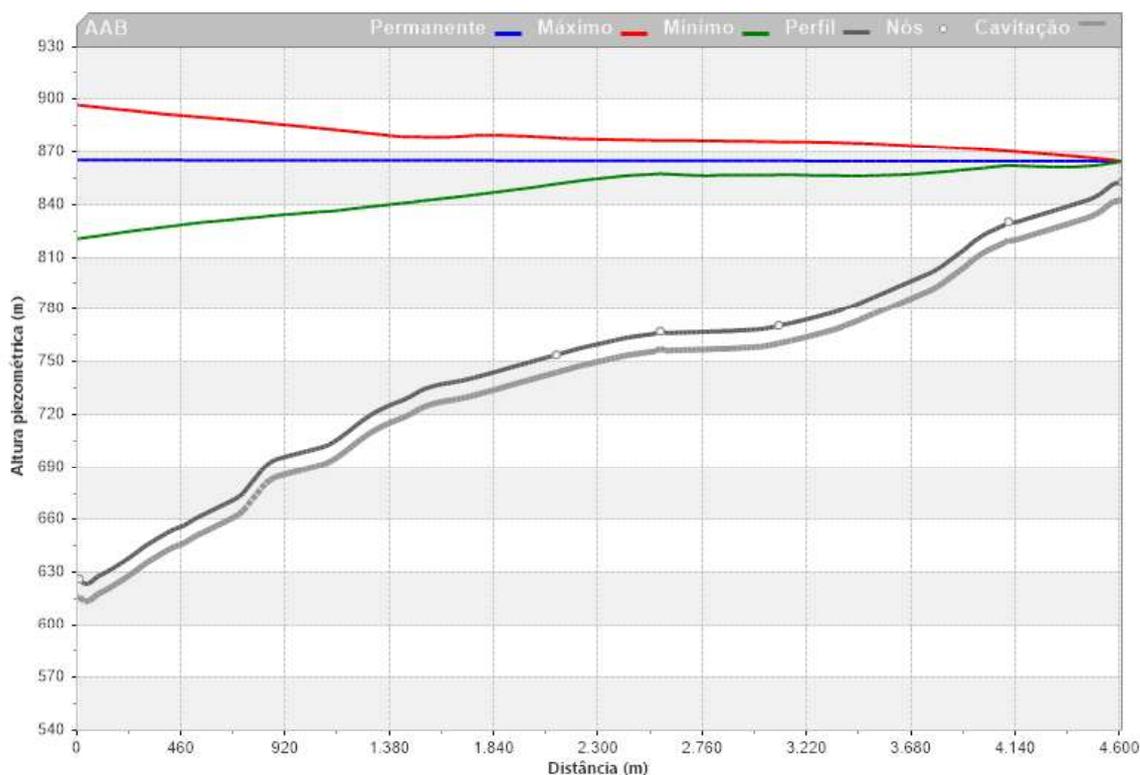
No sexto cenário (Figura 37), foi realizado a simulação com a adutora provida de todos os seus dispositivos de mitigação, conforme descritos anteriormente.

Figura 37 – Interface cenário 6.



Fonte: Autor (2024).

Figura 38 – Envoltória das alturas piezométricas, cenário 6.



Fonte: Autor (2024).

Após a instalação de todos os dispositivos, observou-se na figura 38 uma redução significativa nas pressões máximas, que atingiram aproximadamente 271 mca, representando uma diminuição de cerca de 22% em comparação com as pressões máximas na adutora sem dispositivos, onde o valor era de 331 mca. Em comparação ao regime permanente, que registra uma pressão de aproximadamente 239 mca, o excedente de pressão foi reduzido para 12%, uma queda substancial frente ao excedente de 38% no cenário inicial.

Além disso, as pressões mínimas distanciaram-se completamente da linha de cavitação, posicionando-se bem acima dessa faixa e eliminando o risco de formação de vapor ou separação de colunas d'água. Outro aspecto relevante foi a diminuição expressiva na variação de pressão entre os picos máximo e mínimo, que no cenário inicial era de cerca de 183 mca, enquanto, após a instalação dos dispositivos, essa variação foi reduzida para 76 mca, representando uma queda de 58%. Essa redução minimiza significativamente o estresse imposto à tubulação, mitigando os impactos adversos do transiente hidráulico.

6 CONCLUSÃO

O estudo realizado analisou os transientes hidráulicos na adutora de água bruta da represa Capim Branco, utilizando o *software* ALLIEVI como ferramenta para simular os cenários operacionais do sistema. A análise demonstrou que as variações de pressão causadas por transientes hidráulicos na adutora, desprovida de qualquer proteção contra o golpe de aríete, representam um risco à integridade estrutural da mesma e à continuidade do abastecimento de água.

Foram construídos diferentes cenários que permitiram avaliar a eficácia dos dispositivos de mitigação instalados atualmente: ventosas, tanques de alimentação unidirecional (TAUs) e o reservatório hidropneumático. Foi constatado que, individualmente, os dispositivos apresentam contribuições limitadas para o controle das pressões transientes, sendo necessário o uso combinado para uma atenuação eficaz e reduzir as variações de pressão e afastar os riscos em relação as pressões mínimas, garantindo, assim, maior segurança operacional para o sistema.

As ventosas se demonstraram ineficientes diante do cenário simulado, enquanto os TAUs apresentaram bons resultados quanto ao controle da variação de pressão e cavitação, porém, apenas no final da adutora, onde eles foram instalados. O reservatório hidropneumático foi o responsável pelos melhores resultados, diminuindo a variação de pressões na adutora por completa.

Diante disso, o trabalho reafirma a importância da adoção de medidas adequadas de proteção contra transientes hidráulicos, principalmente em sistemas de grande porte como o de Capim Branco, onde variações de pressão podem impactar diretamente a durabilidade das tubulações e conseqüentemente o abastecimento. Desta forma, recomenda-se a revisão constante das condições de operação e a instalação de dispositivos de controle em pontos críticos do sistema para assegurar a preservação da infraestrutura e a eficiência do fornecimento de água.

Por fim, este trabalho destaca o valor de estudos de modelagem computacional, em *softwares* como o ALLIEVI, na compreensão e mitigação dos impactos do golpe de aríete, se comprovando ferramentas indispensáveis para o planejamento e gestão de sistemas de adução.

REFERÊNCIAS

- SANTANA, Maria Clara Nascimento. **Análise dos transientes hidráulicos em uma adutora localizada no município de Vicência : PE utilizando o software ALLIEVI**. 2018. 65 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.
- CASTRO, M. A. H.; BARBOSA, J. M. C.; SANDERS NETO, V. C. **Análise do efeito do golpe de aríete numa adutora com uma junção de ramificação**. Revista DAE, São Paulo, v. 68, n. 225, p. 135-148, 2020. DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2020.058>
- TASSINARI, L. C. S. **Transientes hidráulicos em sistemas de bombeamento: influência do material do conduto e dispositivo de proteção**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 2017.
- Baracho, Gabriella Oliveira. 2021. **Transiente hidráulico em adutoras: estudo de um sistema adutor em operação em Porto Ferreira-SP**. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/15151>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12215: Projeto de adutora de água para abastecimento público**. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.
- SAINT-GOBAIN, **Artigos Saint-Gobain Canalização, Transiente hidráulico** 2018. Disponível em: . Acesso em: 23 abril 2019.
- AZEVEDO NETTO, J. M. **Manual de Hidráulica**. 8ª edição. Editora Edgard Blücher. São Paulo, 1998.
- BOULOS, P. F.; WOOD, D. J.; LINGIREDDY, S. **Shock and Water Hammer Loading. Pressure Vessels and Piping Systems**. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), 2015.
- Chaudhry, M. H. **Applied Hydraulic Transients**, 2014.
- ONU. Resolução 64/292. (ONU, Ed.) **The Human Right to water and sanitation**. Anais...Zaragoza: ONU, 2010
- ITA-UPV. **Manual Técnico Allievi**. 1. ed. Valência: [s.n.], 2021
- SOUZA, Edson Victor de. **Uma Contribuição para o Pré-dimensionamento de Reservatórios Hidropneumáticos para Atenuação de Transitórios Hidráulicos**. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil - UNICAMP, 2008. 113p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, 2008.
- TOMAZ, P. **Golpe de aríete em casas de bombas**. São Paulo: Navegar Editora, 2010. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.
- BARBOSA, M. P. R. **Modelagem computacional de chaminés de equilíbrio e tanques**

de alimentação unidirecional como dispositivos atenuadores do golpe de aríete em adutoras. 2006. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental)-Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

Masiero Junior, Pedro Antonio. **Análise de Transientes Hidráulicos em uma Adutora Utilizando o Método das Características.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

STREETER, V. L. .; E. B. WYLIE. **Fluid mechanics.** Nova York: McGraw-Hill Book Company, 1979.

AGOSTINHO, M. S. P.; PILOTTO, J. S. **Transiente hidráulico: Estudo de caso em uma linha de recalque do sistema de abastecimento integrado de Curitiba e região metropolitana.** Tratamento de Água, 2019.

FERNANDES, C. **Equipamentos para proteção das tubulações – peças especiais e aparelhos.** Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Campina Grande, 2009

Aguiar, Clara Resende de. **Análise de Transientes Hidráulicos em Sistema de Adução de Água por Bombeamento.** Monografia de Projeto Final em Engenharia Ambiental II – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 2020.

A.R.I Air Valve, site www.arivalve.com, acessado em outubro de 2024

MARTIN, C.S. (1999). **Hydraulic Transients Design for Pipeline Systems. Hydraulic Design Handbook.** L. W. Mays. New York, NY, Mcgraw-Hill

AQUINO, Genivaldo Alcântara de. **Caracterização do escoamento de ar em adutoras e válvulas ventosas.** 2013. 138 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP.

CAMPARGO, Luiz A. **O golpe de aríete em tubulações de recalque: análise simplificada.** In: ENCONTRO DE ENGENHEIROS DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA, XV, 1989, Joinville/SC: Tigre S.A., 1989.

UBERLÂNDIA. **DMAE leva água da Capim Branco ao reservatório do Custódio Pereira.** Disponível em: <https://www.uberlandia.mg.gov.br/2021/03/01/dmae-leva-agua-da-capim-branco-ao-reservatorio-do-custodio-pereira/>. Acesso em: 26 jul. 2024.

ANEXOS

Confirmação de concessão dos projetos da adutora do Capim Branco pelo Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE) de Uberlândia, vinculada ao Protocolo nº 2023004953, para desenvolvimento do trabalho de conclusão de curso. Enviada via e-mail.

28/11/2024, 14:56

Gmail - ENC: Protocolo nº2023004953- Documentos para uso em trabalho de conclusão de curso



Marcos Riul Tonin <marcosrt23@gmail.com>

ENC: Protocolo nº2023004953- Documentos para uso em trabalho de conclusão de curso

Paolla Tereza Santos <paolla.dmae@gmail.com>

28 de novembro de 2024 às 14:25

Para: Marcos Riul Tonin <marcosrt23@gmail.com>

Cc: Lucas José de Oliveira <lucasjose.dmae@gmail.com>, Luiz Henrique Ferreira de Athaydes <luiz.athaydes.dmae@gmail.com>

Boa tarde, Marcos!

Em atendimento a sua solicitação, confirmamos através deste que foram concedidos os projetos da adutora do Capim Branco, no dia 11/10/2023, para desenvolvimento do trabalho de conclusão de curso, por meio do protocolo nº2023004953. Na ocasião, foi assinado o Termo de Responsabilidade pelo Uso e Divulgação de Informações, conforme anexo.

Atenciosamente,

[Texto das mensagens anteriores oculto]



2023004953-Termo de Responsabilidade pelo Uso e Divulgação de Informações.pdf

66K