

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

GABRIELLA OLIVEIRA BARACHO

TRANSIENTE HIDRÁULICO EM ADUTORAS:  
Estudo de um sistema adutor em operação em Porto  
Ferreira-SP

SÃO CARLOS -SP  
2021

GABRIELLA OLIVEIRA BARACHO

TRANSIENTE HIDRÁULICO EM ADUTORAS:  
Estudo de um sistema adutor em operação em Porto Ferreira-SP.

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Departamento de  
Engenharia Civil da Universidade Federal  
de São Carlos, para obtenção do título de  
bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Erich Kellner

São Carlos-SP  
2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e Tecnologia  
Departamento de Engenharia Civil

**Folha de aprovação**

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Apresentação de Trabalho de Conclusão de Curso do candidato Gabriella Oliveira Baracho, realizada em 18/11/2021:

---

Prof. Dr. Erich Kellner  
Universidade Federal de São Carlos

---

Prof. Dr. Jorge Akutsu  
Universidade Federal de São Carlos

---

Eng° Guilherme Antonio Costa Araújo

**DEDICATÓRIA**

A todos que acreditam na educação como a chave de  
mudança do mundo. Em especial, meus pais.

## AGRADECIMENTOS

Um engenheiro se constrói ao longo do tempo e a muitas mãos. Esse TCC é o resultado de anos de educação e do esforço de muitos.

Primeiramente, agradecimentos a mim mesma que trabalhei e trabalho incessantemente para atingir minhas metas. Nem uma pandemia me parou. A garra nordestina está entranhada em minha pele.

À família que sempre se esforçou para que eu conseguisse alçar novos voos. Painho e Mainha, vocês são a base de tudo. Rafa, minha eterna referência. Tios, tias, primos, primas, amigos da família: cada incentivo dado culminou neste TCC.

Aos meus amigos de Natal, por estarem sempre comigo, mesmo a 2.800km de distância. Aos meus amigos da UFSCar: vocês são a família que São Carlos me deu e nunca serão esquecidos.

Ao PET Civil UFSCar, que me proporcionou crescimento pessoal e profissional dentro de um grupo de pessoas incríveis.

À todas os, literalmente, dezenas de professores que me desenvolveram e em especial ao meu orientador, Profº Dr. Erich Kellner por sua paciência, suporte e orientação acadêmica, profissional e para a vida.

Às Instituições de Ensino por onde passei. Em especial ao IFRN e a UFSCar que formaram uma técnica-cidadã.

À BRK Ambiental Porto Ferreira pelos dados, equipamentos, confiança e suporte de seus profissionais para a construção desse TCC.

Eu sou um fruto de políticas públicas. Se hoje sou capaz de confeccionar um produto científico e tecnológico é por ter tido a oportunidade de acessar a educação pública e de qualidade. Dessa forma, agradecimentos aos que trabalham por isso.

*“Água mole em pedra dura tanto bate até que fura”*

Provérbio Latino

## RESUMO

O transiente hidráulico é um fenômeno que ocorre quando é imposta uma alteração brusca de comportamento de determinado fluido, seja por mudanças de trajeto (fechamento de válvulas por exemplo) ou alterações de parâmetros físicos como a pressão. Conhecido como golpe de aríete, o efeito é o desequilíbrio das partículas observado através de uma onda de choque composta por pressões muito altas seguidas de pressões muito baixas de forma cíclica e em um curto espaço de tempo. Os resultados vão de desgaste das tubulações até rompimentos. O fenômeno é um risco operacional grave para sistemas de abastecimento de água, pois ocasiona perdas de água, energia, impacto ambiental, risco de contaminação e, quando ocorre em tubos de grande criticidade para um sistema, a descontinuidade de abastecimento. É imprescindível, portanto, verificar a ocorrência do fenômeno e contê-lo. Este trabalho executou o diagnóstico e prognóstico de um sistema adutor por recalque em operação real composto por duas bombas centrífugas em série e duas adutoras conectadas, sendo uma em ferro fundido de DN350 e outra de PVC DEFoFo de DN250 e DN400, onde a última é equipada com uma válvula de alívio e uma ventosa de tríplice função. O diagnóstico, executado através da caracterização do sistema e da modelagem hidráulica de transiente no software Allievi simulando cenários de paradas das bombas de recalque, revelou pressões máximas em média 35% acima da capacidade das tubulações, atingindo cerca de 135mca (enquanto o regime permanente trabalha em média com 70mca) e mínimas negativas de -10 mca (vácuo), indicando a ocorrência de cavitação em praticamente todo o sistema. Os dispositivos já instalados, apesar de ter sua contribuição, não são suficientes para controle do transiente, sendo proposta, portanto, a instalação de dois tanques hidropneumáticos com capacidade de 4m<sup>3</sup> cada um, próximo a saída do barrilete das bombas de recalque. A simulação com os tanques apresenta resultados condizentes com a literatura e demonstra controle das pressões durante o transiente, onde os pontos máximos ficam próximos do patamar regular do regime permanente e as pressões mínimas se tornam positivas e completamente afastadas do limite de cavitação.

**Palavras-chave:** Transiente Hidráulico. Allievi. Sistema de recalque. Golpe de Aríete.

## ABSTRACT

The hydraulic transient is a phenomenon that occurs when a sudden change in the behavior of a certain fluid is imposed, either by changes in route (a valve closing, for example) or changes in physical parameters such as the pressure. Known as water hammer, the effect is the unbalance of particles observed through a shock wave composed of very high pressures followed by very low pressures in a cyclic manner and in a short period of time. The results range from pipe wear to breakage. The phenomenon is a serious operational risk for water supply systems, as it causes losses of water, energy, environmental impact, risk of contamination and, when it occurs in highly critical pipes for a system, discontinuity of supply. Therefore, It is essential to verify the occurrence of the phenomenon and contain it. This work performed the diagnosis and prognosis of a pumping pipeline system in real operation consisting of two centrifugal pumps in series and two connected pipelines, one in DN350 cast iron and the other in DN250 and DN400 PVC DEFoFo, where the latter is equipped with a relief valve and a triple function suction cup. The diagnosis, performed through the characterization of the system and the hydraulic transient modeling in the software Allievi, simulating scenarios of stoppages of the booster pumps, revealed maximum pressures on average 35% above the capacity of the pipes, reaching about 135mca (while the steady state works on average with 70mca) and negative minimums of -10mca (vacuum), indicating the occurrence of cavitation in practically the entire system. The devices already installed, despite having their contribution, are not sufficient to control the transient, therefore, it is proposed to install two closed surge tanks with a capacity of 4m<sup>3</sup> each, close to the output of the booster pumps pipes . The simulation with the tanks presents results consistent with the literature and demonstrates control of pressures during the transient, where the maximum points are close to the regular level of the steady state and the minimum pressures become positive and completely far from the cavitation limit.

**Keyword:** Hydraulic Transient. Allievi. Pumping System. Water Hammer.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Desenho esquemático da ocorrência de golpe de aríete .....	20
Figura 2 - Logomarca Software Allievi .....	23
Figura 3 - Simbologia dos tipos de elementos do Allievi .....	23
Figura 4 - Exemplo de Representação esquemática de um subsistema adutor .....	24
Figura 5 - Exemplo de resultados obtidos no Allievi para uma adutora .....	25
Figura 6 - Fluxograma de elaboração de estudo.....	28
Figura 7 - Fluxograma de análise de transitórios .....	35
Figura 8 - Perfil de elevação de terreno e tubulação da Adutora 1.....	39
Figura 9 - Perfil de elevação de terreno e tubulação da Adutora 2.....	40
Figura 10 - Topologia geral da simulação .....	41
Figura 11 - Topologia da Simulação com identificação de elementos .....	42
Figura 12 – Envoltória das alturas piezométricas máximas e mínimas da Adutora 1 na atual operação (sem proteção), cenário 1 .....	45
Figura 13 – Envoltória das pressões máximas e mínimas da Adutora 1 na atual operação (sem proteção), cenário 1 .....	45
Figura 14 - Envoltória das alturas piezométricas máximas e mínimas da Adutora 1 na atual operação (sem proteção), cenário 2 .....	46
Figura 15 - Envoltória das pressões máximas e mínimas da Adutora 1 na atual operação (sem proteção), cenário 2 .....	47
Figura 16 – Envoltória das alturas piezométricas máximas e mínimas da Adutora 2 na atual operação (sem proteção), cenário 1 .....	49
Figura 17 - Envoltória das pressões máximas e mínimas da Adutora 2 na atual operação (sem proteção), cenário 1 .....	49
Figura 18 – Envoltória das alturas piezométricas máximas e mínimas da Adutora 2 na atual operação (sem proteção), cenário 2 .....	51
Figura 19 - Envoltória das pressões máximas e mínimas da Adutora 2 na atual operação (sem proteção), cenário 2 .....	51
Figura 20 - Componentes de um THO .....	56
Figura 21 - Esquema de funcionamento de um THO .....	57
Figura 22 - Desenho esquemático da instalação de um tubo atenuador de celeridade.....	58
Figura 23 - Corte da estação de calibração de um tubo atenuador de celeridade instalado em adutora .....	58
Figura 24 - Envoltórias de altura manométrica máxima e mínima usando a teoria do fluxo incompressível.....	59
Figura 25 - Topologia da simulação hidráulica em fase de prognóstico .....	60
Figura 26 - Envoltória das alturas piezométricas máximas e mínimas da Adutora 1 com o THO (com proteção), cenário 3.....	61
Figura 27 - Envoltória das pressões máximas e mínimas da Adutora 1 com o THO (com proteção), cenário 3.....	61
Figura 28 - Envoltória das alturas piezométricas máximas e mínimas da Adutora 2 com o THO (com proteção), cenário 3.....	62
Figura 29 - Envoltória das pressões máximas e mínimas da Adutora 2 com o THO (com proteção), cenário 3.....	62
Figura 30 - Variação de volume de água dentro de cada THO ao longo do transiente no cenário 3.....	63
Figura 31 - Envoltória das alturas piezométricas máximas e mínimas da Adutora 1 com o	

THO (com proteção), cenário 4.....	64
Figura 32 - Envoltória das pressões máximas e mínimas da Adutora 1 com o THO (com proteção), cenário 4.....	64
Figura 33 - Envoltória das alturas piezométricas máximas e mínimas da Adutora 2 com o THO (com proteção), cenário 4.....	65
Figura 34 - Envoltória das pressões máximas e mínimas da Adutora 2 com o THO (com proteção), cenário 4.....	65
Figura 35 - Variação de volume de água dentro de cada THO ao longo do transiente no cenário 4.....	66
Quadro 1 - Apresentação de dispositivos de controle de transiente.....	26
Quadro 2 - Características físicas das bombas.....	30
Quadro 3 - Características das adutoras.....	31
Quadro 4 - Matriz GUT de referência.....	34
Quadro 5 - Lista de conexões e dispositivos identificados .....	38
Quadro 6 - Dados inputados por elemento da simulação.....	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características operacionais das bombas.....	30
Tabela 2 - Matriz de criticidade GUT para Adutora 1 .....	48
Tabela 3 - Matriz de criticidade GUT para Adutora 2 .....	53

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
EEAB	Estação Elevatória de Água Bruta
ETA	Estação de Tratamento de Água
FoFo	Ferro Fundido
NBR	Norma Brasileira
PFR	Porto Ferreira
SAA	Sistema de Abastecimento de Água
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
THO	Tanque Hidropneumático

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	JUSTIFICATIVA .....	15
1.2	OBJETIVOS .....	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO .....	17
2.1	SISTEMA DE ADUÇÃO DE ÁGUA BRUTA.....	17
2.2	TRANSIENTE HIDRÁULICO .....	19
2.3	PROGRAMA ALLIEVI.....	23
2.4	MEDIDAS MITIGADORAS .....	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	28
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO.....	29
3.2	VISTORIA DE CAMPO.....	31
3.3	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	32
3.4	DIAGNÓSTICO E PROGNÓSTICO.....	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	37
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA ADUTOR.....	37
4.2	SIMULAÇÃO HIDRÁULICA REGIME TRANSIENTE.....	41
4.3	DIAGNÓSTICO .....	44
4.3.1	Adutora 1.....	44
4.3.2	Adutora 2.....	48
4.3.3	Sistema Adutor.....	53
4.4	PROGNÓSTICO.....	54
4.4.1	Determinação do dispositivo de atenuação de onda.....	55
4.4.2	Dimensionamento dos Tanques Hidropneumáticos.....	58
4.4.3	Envoltórias das adutoras sob transiente com proteção.....	60
4.4.4	Instalação dos tanques hidropneumáticos.....	67
5	CONCLUSÕES.....	68
6	REFERÊNCIAS .....	70
	APÊNDICE A – Localização Do Objeto De Estudo .....	72
	APÊNDICE B – Projeto <i>As Built</i> Da Captação Vila Sybilla .....	74
	APÊNDICE C – Perfil Das Linhas De Adução De Água Bruta 01 E 02 .....	77
	APÊNDICE D – Planilha de Cotas das adutoras.....	80
	APÊNDICE E – Rotina de Operação do Sistema Adutor de Água Bruta de Porto Ferreira ..	84
	APÊNDICE F – Anteprojeto proposto para proteção contra golpe de aríete .....	86

ANEXO A – Ficha Cadastral Bombas EEAB.....	88
ANEXO B – Dados Operacionais da Válvulas de Alívio.....	90
ANEXO C – Catálogo Tanques hidropneumáticos.....	91

## 1 INTRODUÇÃO

O sistema de abastecimento de água é um dos componentes de maior criticidade dentro dos ambientes urbanos. A ONU reconhece tal importância ao estabelecer em sua Resolução nº 64/292 a água como um direito humano, além de solicitar que esta água seja segura, limpa, acessível (fisicamente e financeiramente) e potável (ONU, 2010).

O abastecimento de água é, portanto, uma necessidade coletiva a ser atendida por prestadores de serviço público de saneamento básico - dado o abastecimento de água como um de 4 (quatro) dos seus componentes -. Sob tal perspectiva, a Lei Nº 11.445/2007, alterada pela Lei Nº 14.026/2020, estabelece que os serviços públicos de saneamento básico serão prestados com base nos seguintes princípios fundamentais: XI - segurança, qualidade, regularidade e continuidade (BRASIL, 2007).

Com efeito, é dever das prestadoras de serviço garantir que a operação de seus sistemas seja segura, estando cientes e preparadas para eventos que configurem risco à operação do SAA, sejam esses de qualidade da água ou de funcionamento dos componentes físicos do sistema.

Dentro as partes mais importantes a serem avaliadas em um estudo dos riscos operacionais estão as instalações que podem interferir diretamente na continuidade do abastecimento. Nesse caso, destacam-se as adutoras de água bruta, fundamentais para o fornecimento de água e que, em geral, trabalham como condutos forçados ao estarem conectadas a conjuntos elevatórios impulsores da água até as unidades de tratamento, através de tubulações.

Condutos forçados estão mais sujeitos aos efeitos do fenômeno de golpe de aríete ocasionado pelo regime transiente do escoamento de um fluido. Também conhecido como transiente hidráulico, o golpe de aríete ocorre mediante alterações bruscas do movimento de um líquido (NETTO *et al*, 1998), causando sobrepressões e/ou sobpressões nas tubulações. Esse fenômeno tem como possíveis consequências falhas benignas ou catastróficas, onde:

“A falha catastrófica ocorre durante um evento de golpe de aríete quando os tubos se rompem, as juntas se movem, ocorre ruído excessivo, etc. A falha benigna pode ocorrer durante um período de anos e pode consistir em falha do revestimento, corrosão na parede do tubo e intrusão de água contaminada.” (DAVIS, 2010).

Em ambos os casos temos a possibilidade de vazamentos levando à

descontinuidade do abastecimento de água (no primeiro caso principalmente) e causar perdas variadas nas operações – como o desperdício de água e energia - além do impacto ambiental associado.

O fenômeno do golpe de aríete é descrito pela equação da quantidade de movimento e pela equação da continuidade, ambas equações diferenciais parciais hiperbólicas não-lineares (MATTIELLO, 2017). Dessa forma, o estudo desse fenômeno se torna mais eficiente através do uso de *softwares* capazes de executar simulações computacionais com métodos de cálculo numérico utilizando de várias iterações para obter os resultados com o menor erro possível.

Dentro dos programas mais conceituados e acessíveis está o *Allievi*, software profissional de cálculo e simulação hidráulica desenvolvido pelo Instituto Tecnológico de Água da Universidade Politécnica de Valência. O programa tem como princípio o Método das Características, metodologia de cálculo amplamente aceita e com resultados confiáveis, consolidado como técnica de previsão de transientes em projetos de concepção e executivos (ITA-UPV, 2010).

No caso de adutoras já em operação, um estudo de transiente hidráulico deverá considerar a idade das adutoras, dispositivos instalados e condições operacionais em geral.

O trabalho a ser aqui apresentado, objetiva, portanto, o diagnóstico de um sistema adutor em funcionamento de forma a determinar possíveis riscos e embasar futuros prognósticos, tendo como metodologia a utilização de modelos computacionais e teóricos consolidados, assim como a consideração das características operacionais praticadas em uma concessão de abastecimento de água típica.

Neste caso, o estudo será feito no sistema de recalque de água bruta de Porto Ferreira, município do estado de São Paulo, composto por dois conjuntos elevatórios e duas linhas de adução, que fazem o transporte sob pressão da água do rio Mogi-Guaçu até a Estação de Tratamento de Água.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O estudo de transiente hidráulico em sistemas de abastecimento de água é crítico não só sob a perspectiva de engenharia como também operacional e gestora. Afinal, esse estudo tem como produto a previsibilidade do impacto de alterações no

fluxo de água, que podem ocorrer por motivos diversos – manobra de registros, quedas de energia elétrica, problemas com conjuntos elevatórios, etc -. Esse parecer técnico dá à Gestão do SAA a capacidade de preparação de um plano de melhoria das operações e de contingência em caso de sinistro.

Dá subsídio ainda a possíveis expansões e alterações do sistema, fornecendo um modelo computacional de fácil manipulação com possibilidade de criação de diferentes cenários de comportamento para um mesmo conjunto. Torna-se, portanto, uma ferramenta de engenharia para tomada de decisão.

Considerando que o estudo será feito em um SAA operante, em um município típico, a metodologia aqui aplicada tem possibilidades de aplicação em configurações semelhantes, o que é benéfico, visto que o estudo de transiente tem sido uma demanda recente adotada pelas organizações preocupadas com os riscos operacionais de seus sistemas.

O estudo configura, portanto, uma contribuição técnica, pelo estudo hidromecânico em si, e também gestora ao avaliar riscos de uma instalação, reafirmando o papel da engenharia civil como ente técnico, tático, estratégico e operacional.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste estudo é a avaliação do desempenho de um sistema adutor de água bruta em operação sob efeitos do regime transiente, através do software *Allievi*. Os resultados trazem o conhecimento do comportamento das adutoras quando estressadas por eventos causadores de transiente hidráulico e suas consequências.

Para tanto, os objetivos específicos são:

- Caracterizar o sistema adutor existente;
- Submeter o objeto de estudo a simulação hidráulica de regime transiente;
- Apresentar diagnóstico do sistema sob aspectos técnicos e operacionais;
- Apresentar alternativas de prognóstico.

Com efeito, pretende-se consolidar o conhecimento sobre transiente hidráulico e confeccionar um produto de engenharia aplicável à uma prestadora de serviços de

saneamento.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

A temática desse trabalho envolve o estudo de um fenômeno hidráulico sob âmbito de projeto e em operação, trazendo, portanto, resultados relevantes principalmente sob a perspectiva recente da necessidade das prestadoras de serviços de saneamento básico em conhecer o comportamento do próprio sistema.

Para formar uma base sólida que permita o bom desenvolvimento dos estudos e subsidie os resultados obtidos assim como as conclusões construídas é imperativo estudar o local onde o fenômeno ocorre, a descrição do próprio transiente hidráulico, as ferramentas utilizadas para identificar e mensurar o transitório e, por fim, quais as medidas que possam trazer mais segurança ao sistema, quando necessário.

Dessa forma, é apresentado a seguir o referencial teórico deste estudo incluindo os principais autores e produções literárias e acadêmicas de referência nos pontos orientadores deste trabalho.

### 2.1 SISTEMA DE ADUÇÃO DE ÁGUA BRUTA

O Sistema de Abastecimento de Água (SAA) é composto por manancial, captação, estação elevatória, adutoras, estação de tratamento de água, reservatório e rede de distribuição (TSUTIYA, 2006). A ordem entre estes pode ser alternada, havendo estações elevatórias e reservatórios dentro do sistema de distribuição, por exemplo.

Dentro as unidades acima mencionadas, destacam-se as adutoras: canalizações principais destinadas a conduzir água entre as unidades de um sistema público de abastecimento que antecedem o sistema de distribuição (NETTO, 1998). Esse destaque se dá pela sua crucialidade para o funcionamento do sistema haja dito:

“[...] paralizações em seu funcionamento [das adutoras] comprometem as demais unidades do sistema de abastecimento e podem vir a desabastecer a população em uma eventual ruptura, dependendo do tempo necessário para o seu conserto” (HARTMANN, 2019).

As adutoras podem transportar água bruta ou tratada, e utilizar como energia de transporte a própria gravidade, uma energia imposta por equipamento moto-bomba

– chamada adutora por recalque – ou ainda uma mistura de ambos (NETTO et al, 1998).

O sistema de adução em si seria conjunto de encanamentos, peças especiais e obras de arte destinados a promover a circulação da água (GARCEZ, 1981). Isso inclui tanto as adutoras quanto, quando funcionando por recalque, os equipamentos que promovem a energia, e os dispositivos controladores. Constitui um sistema de estudo complexo, onde é observada uma gama fenômenos da mecânica dos fluídos, permitindo estudo variados.

No caso de sistemas adutores temos a água em movimento, abrindo portas para os estudos da dinâmica dos líquidos. Esse movimento, chamado escoamento pela Hidráulica, é melhor entendido quando classificado de acordo com os princípios e as leis da dinâmica. (PORTO, 2006).

Como princípio básico para o estudo hidráulico, é importante compreender como se dá o escoamento dos fluidos para assim poder classificá-los. Essa separação é importante para a determinação das leis e equações que regem e descrevem o comportamento do fluido viabilizando previsões e adequações necessárias.

Primordialmente, os escoamentos podem ser divididos entre laminares e turbulentos, de acordo com os conceitos abaixo propostos por Porto (2006):

- Escoamento Laminar: as partículas do fluido se movem ao longo de trajetórias definidas, em camadas ou lâminas.
- Escoamento Turbulento: as partículas se movem em trajetórias irregulares, aleatórias.

Essa classificação é proposta por Osbourne Reynolds que, após experimentos construiu uma equação que determina através da análise da viscosidade do fluido, o diâmetro da canalização e a velocidade de escoamento, o chamado número de Reynolds –  $Re$  – apresentado na Eq. 2.1. Para fluidos com Reynolds abaixo de 4.000, o escoamento é laminar. Para número acima de 4.000, turbulento (NETTO *et al*, 1998).

$$Re = \frac{V * D}{\nu} \quad (2.1)$$

Onde,

$V$  é a velocidade do fluido (m/s);

$D$  é o diâmetro da canalização (m) e;

$\nu$  é a viscosidade cinemática (m<sup>2</sup>/s)

Observa-se, portanto, que a viscosidade é a propriedade que age no amortecimento da turbulência. No caso dos sistemas de adução aqui estudados o fluido é a água, um líquido de viscosidade baixa, resultando, em geral em escoamentos turbulentos, sendo esses os mais comuns nos problemas de Engenharia estudados pela Hidráulica (PORTO, 2006).

O sistema de adução em estudo é do tipo “por recalque”, onde a pressão na tubulação deve ser suficiente para que o líquido preencha toda a seção transversal do tubo, sem haver contato com a atmosfera. É considerado, portanto, do tipo forçado.

Finalmente, chega-se à classificação do tipo de regime que pode ser do tipo permanente, onde as propriedades do fluido são invariáveis em cada ponto do espaço no tempo, ou transiente, quando essas propriedades variam (PORTO, 2006). O regime transiente é caracterizado por ocorrer entre dois regimes permanentes (STREETER; E. B. WYLIE, 1979).

Pensando no SAA, para que o regime permanente ocorra as condições de contorno devem ser invariáveis com relação ao tempo, incluindo as demandas, a operação das bombas, a abertura das válvulas ou os níveis dos reservatórios (BULHÕES, 2017). Em caso de alterações dessas condições é possível a ocorrência do regime transiente, culminando em alterações principalmente das pressões ao longo da tubulação. A magnitude dessas alterações e suas implicações é o tema de estudo deste trabalho.

## 2.2 TRANSIENTE HIDRÁULICO

O fenômeno físico – mais especificamente hidráulico – do Transiente é aquele onde há uma retardação ou aceleração rápida de um fluido dentro de um conduto de seção transversal preenchida - um conduto forçado. Essa alteração repentina de comportamento, em geral associada à algum dispositivo ou equipamento (válvulas e bombas), causa um pulso de alta pressão que é propagado a jusante do ponto de parada do fluido. (STREETER; E. B. WYLIE, 1979).

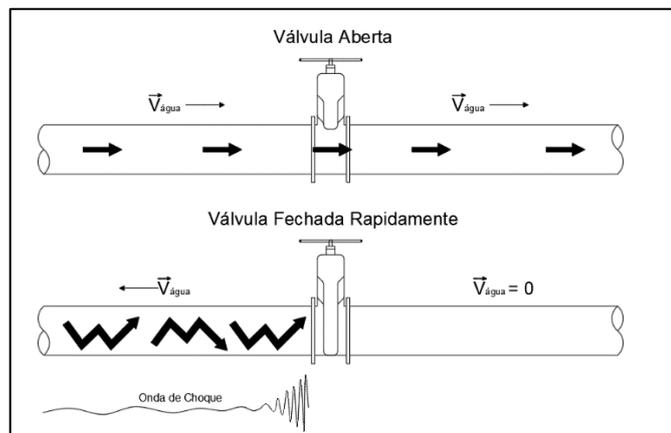
Boulos *et al.* (2005) indica como causas típicas para o gatilho do Transiente Hidráulico o fechamento e abertura de válvulas, alterações nas pressões de condição de contorno (como mudanças de níveis de reservatórios), alterações rápidas de demanda (como um hidrante sendo utilizado), ligar ou desligar bombas e ainda o enchimento ou drenagem das tubulações. Destaca-se o fator tempo de manobra como

crucial para o aparecimento do transiente e caracterizar sua magnitude.

O efeito de tal fenômeno é o chamado golpe de aríete, denominado por Netto (1998) como o choque violento que se produz contra as paredes de um conduto forçado, muitas vezes acarretando em sons de marteladas na tubulação, causados pela transformação da energia em, além de pressão, energia acústica. Essa energia acústica causadora do som de marteladas, bem como outras perdas de energia (incluindo a fricção do fluido), faz com que as ondas de pressão do transiente diminuam gradualmente até a estabilização da velocidade e pressão (BOULOS *et al.*, 2005).

A Figura 1 exemplifica um golpe causado pelo fechamento repentino de uma válvula em um conduto forçado. O fluxo, antes contínuo, é travado, invertendo o sentido do vetor velocidade da água, o que causa o desarranjo do fluido e uma onda de choque que se perpetua até a regularização das pressões dentro da tubulação:

Figura 1 - Desenho esquemático da ocorrência de golpe de aríete



Fonte: Autoria própria (2021).

Essa onda causa efeitos repetitivos de sobrepressão e depressão – ou seja, aumentando e diminuindo as pressões – causados pelo fluido tentando sair da tubulação e sendo impedido pelas suas duas pontas fechadas, até a dissipação da onda (NETTO, 1998). A velocidade da onda é calculada pela Fórmula de Allievi apresentada a seguir, que calcula o parâmetro Celeridade do fluido:

$$C = \frac{9.900}{\sqrt{48,3 + k \frac{D}{e}}} \quad (2.2)$$

Onde,

C = Celeridade da onda (m/s);

D = Diâmetro da tubulação (m);

e = espessura do tubo (m) w;

k = fator de elasticidade calculado da seguinte forma:

$$k = \frac{10^{10}}{E} \quad (2.3)$$

A Elasticidade E é definida de acordo com o material da tubulação.

A Celeridade pode variar de aproximadamente 575 m/s a 1360 m/s, podendo ultrapassar ou se manter abaixo desses valores, de acordo com as características da tubulação. Em média, o valor está em torno de 1.000 m/s (equivalente a 3.600km/h) (NETTO, 1998)

Já o tempo de propagação da onda é calculado através do coeficiente  $\tau$  (também chamado “fase” ou ainda “período” da tubulação) que considera o comprimento L da tubulação em metros e a Celeridade apresentada anteriormente:

$$\tau = \frac{2L}{C} \quad (2.4)$$

Uma manobra é considerada rápida quando o tempo de fechamento t é inferior a  $\tau$ . O contrário, configura uma manobra lenta. A ocorrência do golpe de aríete está associada a manobras rápidas resultando em um transiente de curto intervalo de tempo.

O cálculo do golpe de aríete tem como base duas equações diferenciais básicas da mecânica dos fluidos: a equação da continuidade e a equação da quantidade de movimento (2ª lei de Newton). Quando devidamente derivadas e aplicadas as condições de contorno da hidráulica (considerando inclusive que o escoamento é turbulento) são obtidas duas equações, L<sub>1</sub> e L<sub>2</sub>, referentes a equação da continuidade e o princípio fundamental da dinâmica, respectivamente (STREETER; E. B. WYLIE, 1979). As equações são apresentadas abaixo:

$$L_1 = \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + V \sin \theta = 0 \quad (2.5)$$

$$L_2 = g \frac{\partial H}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{fV|V|}{2D} \quad (2.6)$$

Onde,

a = aceleração (m<sup>2</sup>/s);

g = aceleração da gravidade (m<sup>2</sup>/s);

$V$  = Velocidade do fluido (m/s);  
 $H$  = altura da linha piezométrica;  
 $D$  = diâmetro da tubulação (m);  
 $f$  = Fator de atrito de Darcy-Weisbach;  
 $\theta$  = ângulo de inclinação da tubulação.

A resolução desse tipo de sistema de equações exige métodos numéricos como é o caso do Método das Características, empregado pelo *software* utilizado neste trabalho, para cálculo da envoltória de pressões da adutora em estudo. Como não faz parte do escopo deste trabalho a verificação do método de resoluções das equações, essa descrição não será aqui feita.

Apesar de uma alta velocidade, a onda de propagação é, em geral, de curta duração. Entretanto, esse fenômeno tem uma série de efeitos de alto potencial depreciativo às redes de transporte. Como regra geral, os transitórios são geralmente mais graves em estações de bombeamento, trechos com válvulas, em áreas altas, locais de baixa pressão, em válvulas de retenção com baixas pressões estáticas e em locais distantes de reservatórios com cota superior (FRIEDMAN, 2003).

Em resumo, Pejovic *et al.* (1987) aponta que as consequências principais do transiente as pressões altas no sistema (aumentando perdas), a ocorrência de vácuo por baixas pressões (causando a cavitação), vibração hidráulica da tubulação causada pela movimentação da água em alta velocidade e de forma desordenada (causando poluição sonora) e o risco de contaminação do fluido, principalmente nas conexões do sistema (ocasionado por possíveis fissuras nas tubulações).

Os efeitos do transiente podem causar falhas a curto ou longo prazo. As falhas curtas configuram rupturas das tubulações e movimentação das conexões, por exemplo, o que causam perda de água imediata. As falhas de longo prazo estão associadas a corrosão das paredes do tubo e prejuízo do revestimento causando fissuras (DAVIS, 2010).

Em ambos os casos, além do prejuízo material com a reparação da tubulação devem ser considerados os custos associados à perda de água, perda da energia envolvida no transporte da água e o impacto ambiental envolvido. No caso de adutoras, esse perigo toma proporções mais preocupantes, pois reparos causam paradas do abastecimento do sistema de água, comprometendo toda a operação e trazendo possíveis discontinuidades de disponibilidade de água para a população.

### 2.3 PROGRAMA ALLIEVI

O *software* Allievi foi desenvolvido pela Universidade Politécnica de Valência, na Espanha, e objetiva proporcionar condições para analisar e verificar os efeitos transitórios de manobras efetuadas nos elementos do sistema hidráulico (ITA-UPV, 2010). De licença livre, o programa exige apenas um cadastro na plataforma online do ITA-UPV, sendo uma ferramenta de apoio a estudos de transientes acessível.

Figura 2 - Logomarca Software Allievi



Fonte: ITA-UPV (2021)

A construção da simulação é feita através da inserção da topologia do objeto de estudo segundo elementos disponíveis no software. Cada tipo de elemento possui seus atributos que devem ser preenchidos de acordo com características previamente levantadas pelo modelador. A figura a seguir, retirada do Manual Técnico do Allievi (ITA-UPV, 2010), apresenta os tipos de elementos disponíveis e a representação gráfica deles no programa.

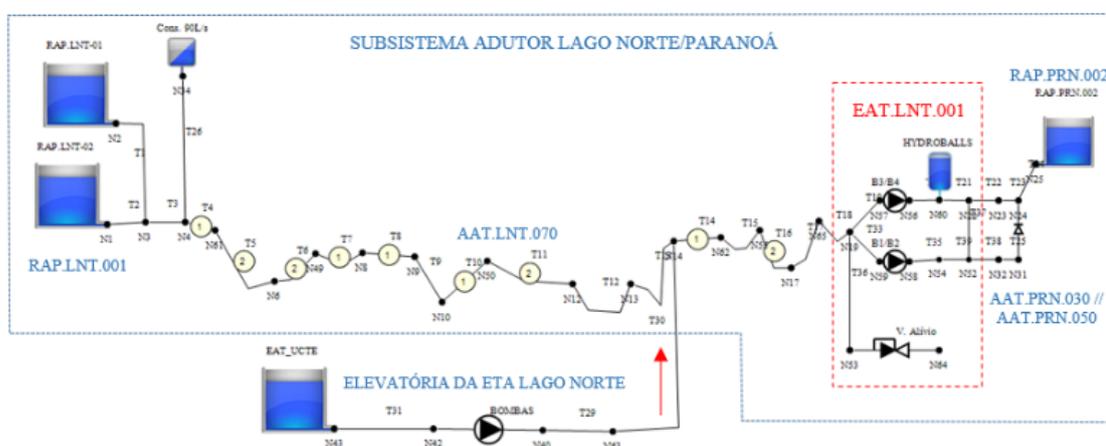
Figura 3 - Simbologia dos tipos de elementos do Allievi

<b><i>Tipos de Elemento</i></b>	<b><i>Representação Gráfica no ALLIEVI</i></b>
<b>1. Nós</b>	 Nó
<b>2. Reservatórios</b>	 N16 N17
<b>3. Tubulações</b>	 N24 N25
<b>4. Estações de bombeamento</b>	 N30 N31
<b>5. Estruturas de Proteção</b>	 N1 N2 N2
<b>6. Estruturas de controle de vazão</b>	 N10 N11 N4 N5
<b>7. Leis de Vazão (Q) ou de carga (H)</b>	 N12 N13
<b>8. Condutos livres (canais)</b>	 N14 N15

Fonte: ITA-UPV (2010)

A figura a seguir apresenta o modelo esquemático do Subsistema Adutor Lago Norte/Paranoá em Brasília/DF, objeto de estudo de Messias (2017) no software Allievi:

Figura 4 - Exemplo de Representação esquemática de um subsistema adutor



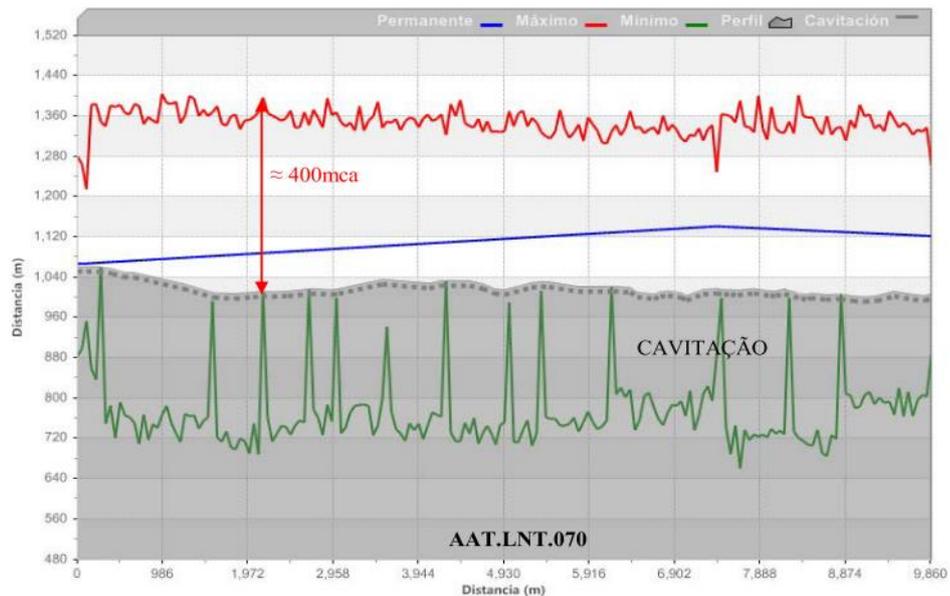
Fonte: Messias (2017)

O cálculo hidráulico é feito através do método das características, utilizado para determinação das envoltórias de pressões das tubulações em estudo. Importante apontar que os resultados obtidos terão como limitantes as condições de contorno informadas ao *software* sendo eles reservatórios, estações de bombeamento, válvulas e demais dispositivos instalados (ITA-UPV, 2010).

Além das condições de contorno com suas especificações os dados de entrada do Allievi se concentram principalmente nas cotas de terreno e assentamento das tubulações, informações que determinam as resoluções.

Os resultados são apresentados em formato de tabela de dados e gráficos que apresentam as linhas de terreno, pressões máximas e mínimas, as chamadas envoltórias de alturas piezométricas. Com isso é possível prever pontos de ruptura, ocorrência de cavitação e o intervalo de pressões que o sistema irá atingir. Além desses, o Allievi apresenta animações da propagação da onda de choque pelas tubulações, um outro instrumento de análise do sistema. A figura a seguir, também provinda do trabalho desenvolvido por Messias (2017) exemplifica o resultado de envoltória obtido.

Figura 5 - Exemplo de resultados obtidos no Allievi para uma adutora



Fonte: Messias (2017)

Em termos de análise de resultados, Messias (2017) indica que a ferramenta é eficiente principalmente porque gráficos resultantes das simulações permitiram elucidar e justificar soluções adotadas para resolução do transiente para pontos aceitáveis.

Destaque-se o fato que o Allievi tem disponibilidade para a construção de diferentes cenários e permite diagnosticar e visualizar os efeitos transitórios no sistema já em operação ao se simular várias manobras numa instalação previamente instalada ou projetada (ITA-UPV, 2010).

## 2.4 MEDIDAS MITIGADORAS

O estudo da envoltória de pressões das tubulações, como mencionado anteriormente, permite o diagnóstico dessas unidades de operação lineares. Uma vez determinadas as falhas e suas causas, é possível propor resoluções para os efeitos indesejados.

Uma série de metodologias de escolha pode ser adotada objetivando reduzir os impactos do golpe de aríete, a depender da fase de vida do sistema onde o estudo está sendo desenvolvido (viabilidade, projeto, em operação), orçamento disponível, mão-de-obra e impacto. Boulos *et al.* (2005) aponta que as medidas mitigadoras podem ser de três tipos:

- Alteração do transiente: mudanças na velocidade do fluido;

- Alterações no sistema: mudanças nas características físicas das redes (diâmetro, material, topografia de assentamento);
- Instalação de dispositivos de controle: inserção de aparelhos, equipamentos ou obras que objetivem esse controle.

Ao reduzir a velocidade do fluido, observando as equações apresentadas anteriormente, o efeito do transiente é reduzido, trazendo uma menor variação das pressões atuantes. Essa redução pode ser conquistada por equipamentos como volantes de inércia instalados em bombas (SILVA, 2006).

As alterações no sistema em si tem como principal chave de mudança o material das redes. Tubulações em Ferro Fundido são mais resistentes aos impactos do transiente tanto na resistência às variações da energia interna quanto ao controle das sobrepressões. Já materiais como Aço Galvanizado e PVC DEFoFo possuem desempenho pior (SANTANA , 2019).

Ainda de acordo com o estudo desenvolvido por Santana *et al.* (2019) o Aço apresenta resultados semelhantes ao Ferro Fundido quanto à resistência às variações energéticas, entretanto, foram encontrados valores de sobrepressão superiores. Esse comportamento também foi observado no PVC DEFoFo. Todavia, esse material apresentou sobrepressões muito maiores e uma resistência inferior a essas pressões, quando comparado ao Ferro Fundido.

Tais propostas são contempladas em soluções propostas por Netto (1998) como a instalação de válvulas de retenção, emprego de tubulações de melhor resistência e construção de obras como câmaras de ar comprimido e chaminés de equilíbrio.

O quadro a seguir apresenta no detalhe as medidas mitigadoras possíveis, suas descrições e quais variáveis devem ser observadas para tomada de decisão:

Quadro 1 - Apresentação de dispositivos de controle de transiente

<b>Dispositivos de Proteção</b>	<b>Atributos</b>	<b>Variáveis de decisão</b>
Válvula de retenção	Limita a vazão em uma direção Permite conexões seletivas Previne/limita esvaziamento da tubulação	Tamanho e Localização Especificações da válvula Características de amortecimento (Antichoque)
Linha de by-pass na bomba	Permite conexão direta e fluxo em torno de uma bomba Pode limitar oscilações entre montante e jusante	Tamanho e localização Pontos exatos de conexão Especificações da válvula

Dispositivos de Proteção	Atributos	Variáveis de decisão
		de retenção
Chaminé de equilíbrio	Permite entrada e saída de fluxo para armazenamento externo Pode necessitar de circulação de água Pode limitar a oscilação entre montante e jusante	Tamanho e localização Especificações das conexões Especificações do reservatório/tanque Nível de extravasamento
Reservatório de ar-comprimido ou hidropneumático	À medida que a pressão muda, a água é trocada, de modo que o volume de ar pressurizado se expande ou contrai.	Localização Volume (total/água/ar) Geometria/Especificações Perdas no orifício e nas conexões
Tanque alimentador unidirecional	Permite fluxo na tubulação de uma fonte externa Necessita de preenchimento do tanque	Tamanho e localização Especificações das conexões Especificações do reservatório
Válvula de antecipação de oscilação	Permite a descarga para drenagem Opera com setpoints de alta e baixa pressão Pode acentuar a oscilação a jusante	Tamanho e localização Setpoints de alta e baixa pressão Tempo de abertura e fechamento
Ventosas de duplo efeito	Quando a pressão cai, abre um orifício para entrada de ar Liberação controlada do ar pressurizado pelo orifício	Localização Tamanhos dos orifícios (pequeno e grande) Especificações da válvula
Válvulas de alívio de pressão	Abre para descarga do fluido a um valor pressão configurado Em geral abre rapidamente e fecha lentamente	Tamanho e localização Setpoint da alta pressão Tempo de abertura e fechamento

Fonte: Traduzido de Boulos *et al.* (2005)

Cada uma das soluções traz diferentes metodologias de controle do transiente. A escolha deve ser orientada tomada de forma a reduzir os efeitos até um ponto aceitável. Deve-se tomar atenção nos pontos críticos e verificar a magnitude dos efeitos para assim determinar os dispositivos mais adequados.

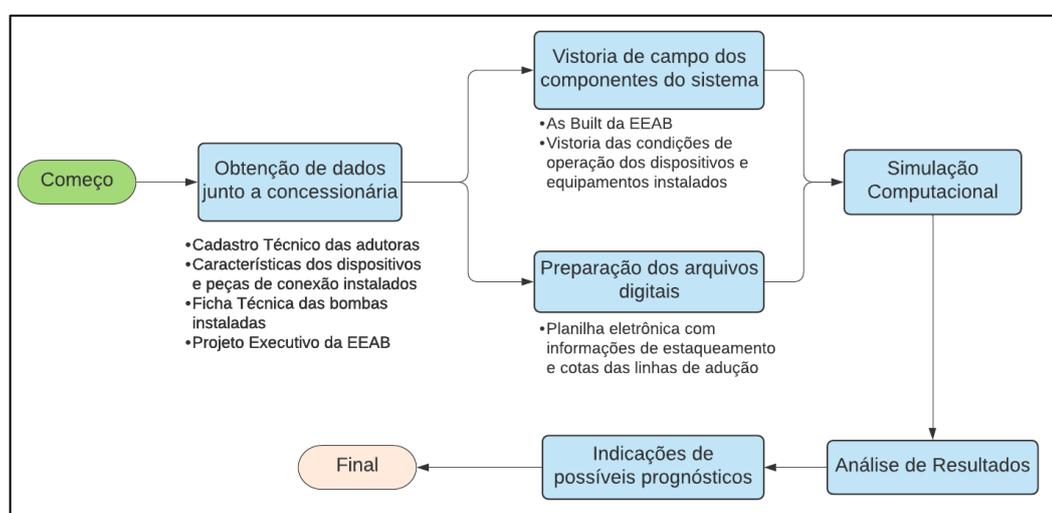
Importante apontar que após a determinação dos dispositivos, o estudo de simulação computacional deve ser novamente executado de forma a validar as escolhas feitas, o que configura uma nova análise das envoltórias com atenção a possibilidade do surgimento de novos pontos críticos ou ainda a não resolução dos pontos anteriormente existentes (TSUTIYA, 2006).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia para análise do sistema adutor e obtenção dos resultados referentes ao comportamento deste sob o regime transiente é apresentada nesta seção de forma a justificar os resultados e permitir a reprodução do trabalho.

Para responder ao problema de pesquisa exposto e atingir os objetivos estipulados é definida uma metodologia que inclui, em termos gerais, a aquisição e preparação de dados, simulação computacional e análise de resultados, dividida nas etapas apresentadas no fluxograma a seguir.

Figura 6 - Fluxograma de elaboração de estudo



Fonte: Autoria Própria (2021)

A fase de “obtenção dos dados junto à concessionária” e “vistoria de campo” fornecem o produto de **CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO**. Já a preparação dos arquivos digitais subsidia a conformidade da simulação computacional de forma que essa se aproxime o máximo possível da realidade da operação do Sistema Adutor.

Após a simulação hidráulica é feita uma análise dos resultados que deverão fornecer os dados de como ocorre o transiente hidráulico nas duas linhas de adução e seus efeitos. Validamente, foi finalizado o trabalho de engenharia ao se fazer recomendações técnicas sobre os resultados.

Os itens a seguir dispõem sobre os materiais necessários a cada fase e os detalhes da metodologia aplicada nas etapas.

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO

O objeto de estudo será o sistema adutor principal de água bruta do SAA Porto Ferreira. A água bruta tem como manancial o Rio Mogi-Guaçu, pertencente a UGHRI 09, na bacia do rio Mogi-Guaçu (SIGRH-SP, 2021).

O sistema de recalque aduz, em média, 200l/s de água bruta para a ETA Oswaldo Cunha Leme, sendo responsável pelo fornecimento de 97% da água consumida pela área urbana do município (BRK, 2021).

Para que seja possível tamanha adução, o sistema é composto pela Estação Elevatória de Água Bruta, denominada EEAB, e duas linhas de tubulações, responsáveis pelo transporte da água até a ETA. A localização dos elementos é disposta no Apêndice A deste documento, em forma de mapa, sendo este o primeiro produto deste estudo.

A EEAB é composta por:

- Canal de captação – canal do tipo aberto, retangular, por gravidade.
- Poço de Sucção – Poço de concreto com tampa de concreto de dimensões de 8,00 x 2,95 m.
- Casa de bombas – Edificação com 3 (três) bombas centrífugas instaladas, todas equipadas com acionamento por inversor de frequência, responsáveis pelo recalque da água do poço de sucção para a ETA através das linhas de recalque. A Casa de Bombas possui uma bomba para a escorva das bombas. O acionamento das bombas principais pode ser feito pelo CCO da SPE, entretanto a bomba de escorva precisa de acionamento manual. A Tabela 1 apresenta as características das bombas quanto ao nome, modelo, fabricante, finalidade e status de funcionamento:

Quadro 2 - Características físicas das bombas

<b>Bomba</b>	<b>Finalidade</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Modelo</b>	<b>Status</b>
BOM.CEN.0001	Recalque de água bruta	IMBIL	IMBIL 150-400	Reserva
BOM.CEN.0002	Recalque de água bruta	KSB	MEGANORM 200-400	Ativa
BOM.CEN.0003	Recalque de água bruta	KSB	MEGANORM 200-400	Ativa
BOM.CEN.0004	Escorva das bombas	KSB	MEGABLOC 4G-125	Ativa

Fonte: Adaptado de (BRK, 2021)

A Tabela 2 apresenta as características de funcionamento das bombas tais quais vazão (m<sup>3</sup>/h), potência do motor elétrico (cv) e diâmetro do rotor (mm).

Tabela 1 - Características operacionais das bombas

<b>Bomba</b>	<b>Vazão (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Potência (cv)</b>	<b>Rotor (mm)</b>
BOM.CEN.0001	300	175	400
BOM.CEN.0002	450	300	404
BOM.CEN.0003	450	300	404

Fonte: Adaptado de (BRK, 2021)

- Caixa de manobras das adutoras – local com válvulas de controle de fluxo de água para as adutoras em operação.

A peça gráfica apresentada no Apêndice B deste documento possui o projeto *As Built* da EEAB Mogi-Guaçu, confeccionado como um produto deste estudo. Já o Anexo A contém as especificações técnicas das bombas instaladas no local.

Partindo para as unidades lineares, são utilizadas duas adutoras no sistema. É importante destacar que ambas possuem como fonte uma mesma tubulação de Ferro Fundido (FoFo) DN400 que transporta a água das bombas até a derivação apresentada na peça gráfica do Apêndice B – na caixa de manobras -. O Quadro 1 apresenta as características físicas mais relevantes para esse estudo:

Quadro 3 - Características das adutoras

<b>Característica</b>	<b>Adutora 1</b>	<b>Adutora 2</b>
Extensão	2.233,00m	2.299,00
Material	Ferro Fundido PN 10	PVC DEFoFo
Diâmetro	350mm	400mm no trecho 01 250mm no trecho 02
Dispositivos instalados	Nenhum	01 Ventosa de Tripla Função 01 Válvula de Alívio

Fonte: Adaptado de (BRK, 2021)

O Apêndice B identifica os trechos de diferentes diâmetros das adutoras.

O Apêndice C, por sua vez, traz as peças gráficas referentes a apresentação das linhas de adução devidamente estaqueadas a cada 20,00m e os perfis de declividade de cada uma destas. Configura o terceiro produto deste estudo.

A adutora 01 não possuía informações em cadastro de sua cota de assentamento. Dessa forma, com o apoio da equipe de manutenção de redes da concessionária foram feitas visitas de campo e uma sondagem para identificar a profundidade da rede. A metodologia de obtenção desses dados é apresentada no item 3.2 VISTORIA DE CAMPO deste documento.

A adutora 02 possuía o projeto executivo disponibilizado pela Engenharia da concessionária para os trechos de DN400mm. O trecho de DN250MM possuía as informações de profundidade em cadastro técnico, sendo possível a construção do perfil de declividade para este trabalho.

As informações de curvas de nível para a complementação dos dados foram disponibilizadas pela SPE e tem como origem o Modelo Digital de Elevação disponibilizado pela plataforma de dados do sensor Alos Palsar (NASA, 2011).

O tratamento dessas informações é apresentado no item 3.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL (pg. 37) deste documento.

### 3.2 VISTORIA DE CAMPO

As vistorias de campo têm por objetivo a complementações dos dados de cadastro técnico e engenharia disponibilizados assim como a averiguação das condições de operação e construtivas dos objetos de estudo. Por fim, junto à equipe de operação, foi levantada a rotina de operação do sistema adutor.

Acompanhadas por funcionários da Concessionária, nas vistorias de campo foram averiguadas as informações constantes nos seguintes projetos executivos disponibilizados pela Concessionária:

- Projeto Hidráulico de reforma e ampliação da captação e adução de água bruta da cidade de Porto Ferreira/SP;
- Levantamento Planialtimétrico cadastral e batimetria – Área da captação Vila Sybilla e;
- Projeto de adutora e rede de recalque de esgoto.

Além disso, a título de complementação de dados, foi feita uma entrevista com os responsáveis pela operação do tratamento de água e pela manutenção de redes.

### 3.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A fim de obter os resultados de forma prática foi adotado o *software* de licença gratuita Allievi construído pela Universidade de Valência, Espanha. Especializado no estudo de transientes hidráulicos, além de possuir licença livre, o programa é amplamente utilizado no mercado tanto para a concepção de projeto como para estudo de sistemas em operação, como é o caso deste estudo.

Como indicado no item 2.3 PROGRAMA ALLIEVI (pg. 32), o *software* tem como metodologia de cálculo o MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS. De modo geral, as Diretrizes de boas práticas de modelagem sugeridas por Boulos *et al.* (2005) foram seguidas de forma a embasar este trabalho tecnicamente e garantir o produto mais acurado possível.

Dentro destas avaliações deve-se destacar a consideração da cavitação nas análises do regime transitório. De acordo com Bulhões (2017) o programa possui uma opção de escolha de consideração ou não da cavitação do sistema, o que, em caso positivo para a opção, limitaria as pressões mínimas às pressões de vapor, configurada pelo programa como 0,0324 bar (pressão de vapor de água a 25°C). Assim como Bulhões (2017), as análises deste trabalho consideraram a opção de avaliação do transitório considerando o fenômeno da cavitação.

Essa decisão é tomada de acordo com o indicado por Boulos *et al.* (2005) na seção de *Considerações para modelagem de transitório* nas Diretrizes para proteção de sistemas de distribuição de água de transientes hidráulicos, onde cita que a cavitação deve ser modelada para na análise de transiente. Se a cavitação ocorrer

em qualquer local do sistema de distribuição, ela pode afetar vastamente os resultados da análise de transientes.

As simulações tiveram como dados de entrada tanto os fornecidos pela concessionária quanto os atualizados e produzidos pela autoria deste trabalho. A descrição das tubulações, equipamentos e dispositivos instalados no sistema adutor em estudo é feita no item 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO (pg. 34).

Para inserção dos dados no sistema foi construída uma planilha eletrônica que possui a identificação de cada trecho, aqui é definido como o espaço entre duas estacas da adutora entre pontos notáveis – apresentada no Apêndice D -, cota da geratriz inferior da tubulação, cota do terreno, comprimento, Diâmetro Nominal e Diâmetro Interno. O coeficiente de Rugosidade de Manning foi obtido pela literatura.

Apesar da incompletude de algumas informações, a idade dos trechos de tubulação foi estimada a partir de entrevista com a equipe de operação da unidade. Esses dados foram comparados com os sugeridos por Porto (2006).

Com os dados em mãos, estes foram inseridos no Allievi e o primeiro cálculo foi executado para o regime permanente. A partir disso calculou-se o transiente hidráulico provocado pelas seguintes situações, utilizando os recursos de cenários do programa:

- Parada de uma bomba na EEAB;
- Parada das duas bombas na EEAB;

Essas situações foram escolhidas pelo histórico do SAA PFR de ocorrência de quedas de energia elétrica na área da EEAB.

Como resultados foram obtidas as envoltórias de pressões nas tubulações e dos tempos de propagação de onda.

### 3.4 DIAGNÓSTICO E PROGNÓSTICO

O diagnóstico ocorrerá de forma a analisar as envoltórias das alturas piezométricas e das pressões nos trechos de tubulação estudados, averiguando as linhas de pressões máximas e mínimas com atenção à capacidade da tubulação de suporte de pressões máximas e à linha limítrofe para ocorrência de cavitação no interior da tubulação (no caso das pressões mínimas).

Boulos *et al.* (2005) considera que, minimamente, os transientes são aceitáveis

quando o fenômeno ocorre, entretanto, as tubulações não experimentam pressões acima de sua capacidade e também essencialmente não serão estressadas por pressões negativas de nenhuma forma. Essa será a prerrogativa para averiguar a aceitabilidade dos transientes.

Os efeitos do transiente hidráulico são classificados de acordo com a matriz GUT de determinação de criticidade – descrita no item 2.4 MEDIDAS MITIGADORAS -, conforme segue abaixo:

Quadro 4 - Matriz GUT de referência

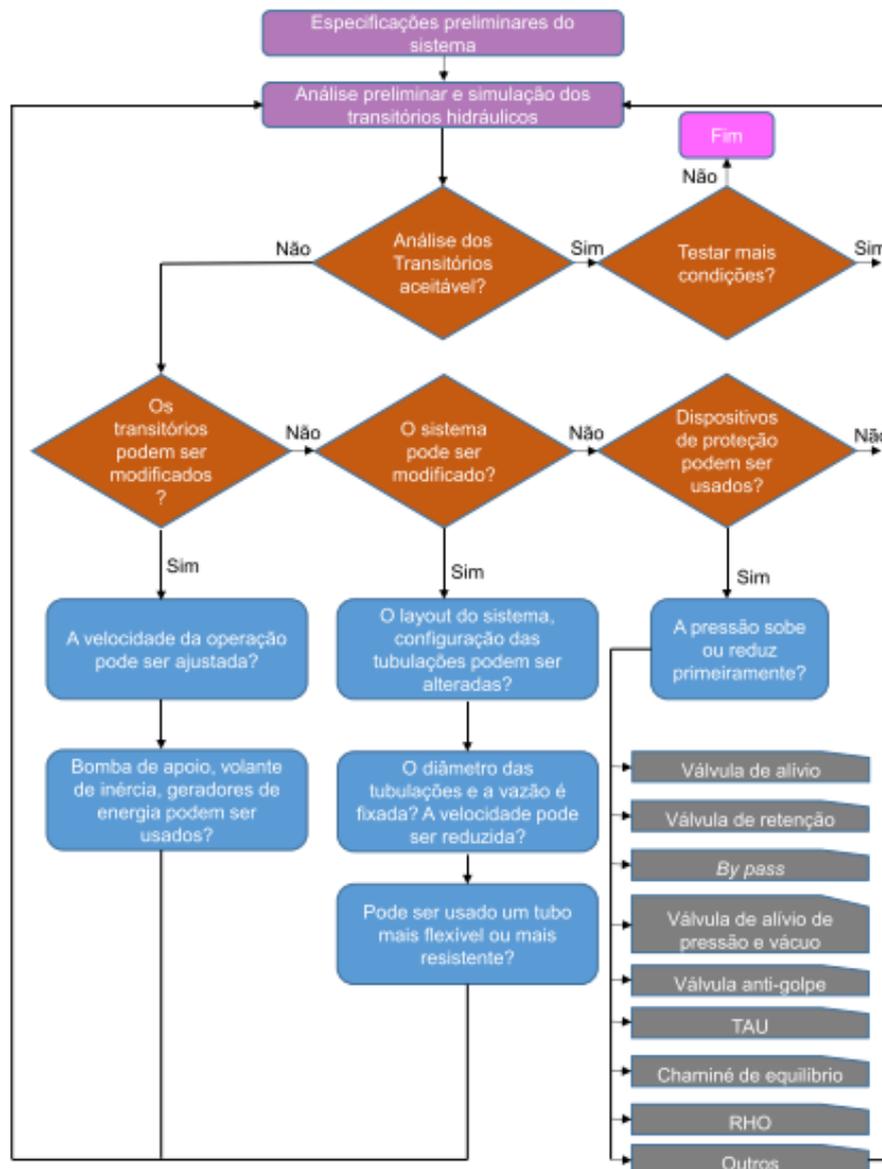
<b>Nota</b>	<b>Gravidade</b>	<b>Urgência</b>	<b>Tendência</b>
5	Extremamente Grave	Precisa de Ação Imediata	Irà Piorar Rapidamente
4	Muito Grave	É urgente	Irà Piorar em Pouco Tempo
3	Grave	O Mais Rápido Possível	Irà Piorar
2	Pouco Grave	Pouco Urgente	Irà Piorar a Longo Prazo
1	Sem Gravidade	Pode Esperar	Não Irà Mudar

Fonte: Periard (2011)

O coeficiente GUT é obtido a partir da multiplicação das notas atribuídas a cada fator de análise de criticidade (gravidade, urgência e tendência). Para GUT acima de 16 o item é considerado crítico.

A análise dos efeitos do transitório no sistema objeto de estudo é feita de acordo com o fluxograma proposto por Boulos *et al.* (2005), ampliado por Jung *et al.* (2009) e traduzido por Bulhões (2017), apresentado na figura a seguir:

Figura 7 - Fluxograma de análise de transitórios



Fonte: Boulos *et al.* (2005); Jung *et al.* (2009) *apud* Bulhões (2017)

Estudando os detalhes do fluxograma enxerga-se que após as fases de CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO com a VISTORIA DE CAMPO – configuram as *Especificações preliminares do sistema* e SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL – fase de *Análise preliminar e simulação dos transitórios hidráulicos* deve-se questionar a aceitabilidade dos transitórios encontrados.

Esse mapeamento tem por objetivo orientar as soluções a serem propostas e a ordem de execução dessas. As recomendações são feitas através das questões que orientam as soluções a serem tomadas no fluxograma. Considerando que o sistema em estudo está em operação, as soluções mais vantajosas são aquelas que

não exijam grandes alterações do sistema e/ou sejam de operação facilitada.

Com efeito, as soluções de modificação do sistema não são viáveis, restando para o prognóstico as linhas de solução 1 e 3 do fluxograma. As soluções recomendadas propõem a melhor técnica, operação e custo, sendo ordenadas entre as de maior criticidade à menor criticidade de implantação, como citado anteriormente. A apresentação das soluções ocorrerá de forma descritiva e via desenhos técnicos preliminares. O detalhamento, porém, deve ocorrer via Projeto Executivo, produto que não faz parte do escopo deste trabalho.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A apresentação de resultados tem por objetivo demonstrar os frutos da metodologia aplicada e apresentada no item 3 MATERIAIS E MÉTODOS (pg. 28) deste documento. Os produtos do trabalho desenvolvido são demonstrados a seguir na ordem dos objetivos anteriormente estabelecidos (item 1.2 OBJETIVOS – pg. 16) a fim de evidenciar seu cumprimento.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA ADUTOR

Os primeiros resultados aqui apresentados cumprem o primeiro objetivo específico anteriormente estipulado, a caracterização do sistema adutor. As informações que foram coletadas, tratadas e consolidadas são a base para a modelagem hidráulica do sistema de recalque em regime permanente para posterior simulação dos cenários de transitórios.

Dentro dessa perspectiva, o primeiro produto é o mapa de localização apresentado no Apêndice A (pg. 72) deste trabalho. No mapa são apresentadas as duas adutoras identificadas por cores apresentando, inclusive, os diâmetros nominais destas, dentro do arruamento de Porto Ferreira.

Em segundo, deve-se pôr que o conjunto dos arquivos disponibilizados pela concessionária e as vistorias de campo produziram os apêndices B e C que dão embasamento a este trabalho a nível de projeto. A seguir, são descritos os conteúdos de cada apêndice e seu impacto no resultado final.

O Apêndice B – Projeto *As Built* da captação Vila Sybila (pg. 74) - traz a atualização do Projeto Executivo de acordo com o observado em campo e o detalhamento das informações relevantes para a modelagem tais quais posicionamento da caixa de manobras e identificações das peças e conexões.

O Apêndice C – Perfil das linhas de adução de água bruta 01 e 02 (pg. 77) -, por sua vez, une essas informações e traz os dados de cota de assentamento, geratriz inferior da tubulação e terreno das tubulações, estando essas estaqueadas a cada 20m e com destaque para mudanças de direção e pontos de instalação de dispositivos. O Apêndice C é a fonte das informações do Apêndice D, descrito mais a frente neste mesmo documento.

Ainda sobre os dispositivos instalados, a vistoria de campo verificou as condições de operação dos dispositivos de alívio, ventosas e registros assim como, a

partir do cruzamento entre os projetos e as inspeções de campo, a lista de conexões e peças que compõem o sistema. A seguir, a lista completa.

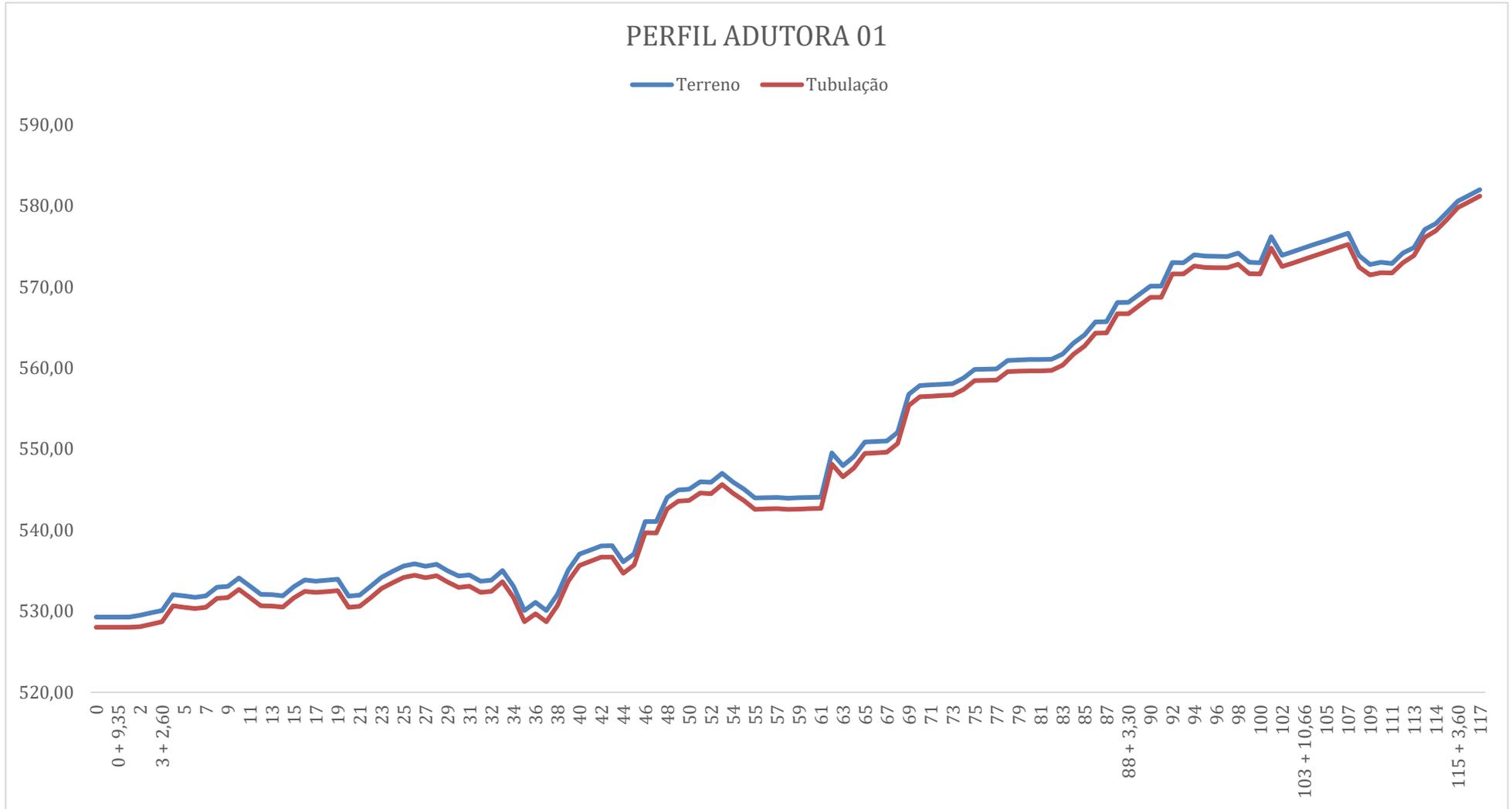
Quadro 5 - Lista de conexões e dispositivos identificados

Local	Peças	Quantidade
Casa de Bombas + Barrilete	Ampliação DN 200 x 250	2
	Válvula de retenção DN 250	2
	Curva 90° DN 250	2
	Registro de gaveta DN 250	2
	Ampliação DN 250 x 300	2
	Junção 45° com redução DN 400 x 300	2
	Redução DN 400 x 250	1
	Flange cego DN 250	1
	Curva 90° DN 400	2
	Junção 45° com redução DN 400	1
Adutora 1	Redução DN 400x300	1
	Tê redução DN 350x100	1
	Registro de gaveta DN 100	1
	Registro de gaveta DN 350	1
	Curva 30°	5
	Curva 45°	1
	Curva 90°	5
Adutora 2	Ampliação DN 400x500	2
	Tê com duas saídas de redução DN 500x100	1
	Válvula de alívio DN 100	1
	Registro de gaveta DN 400	2
	Registro de gaveta DN 100	3
	Ventosa tripla	1
	Curva 45°	2
	Curva 90°	4

Fonte: Autoria própria (2021)

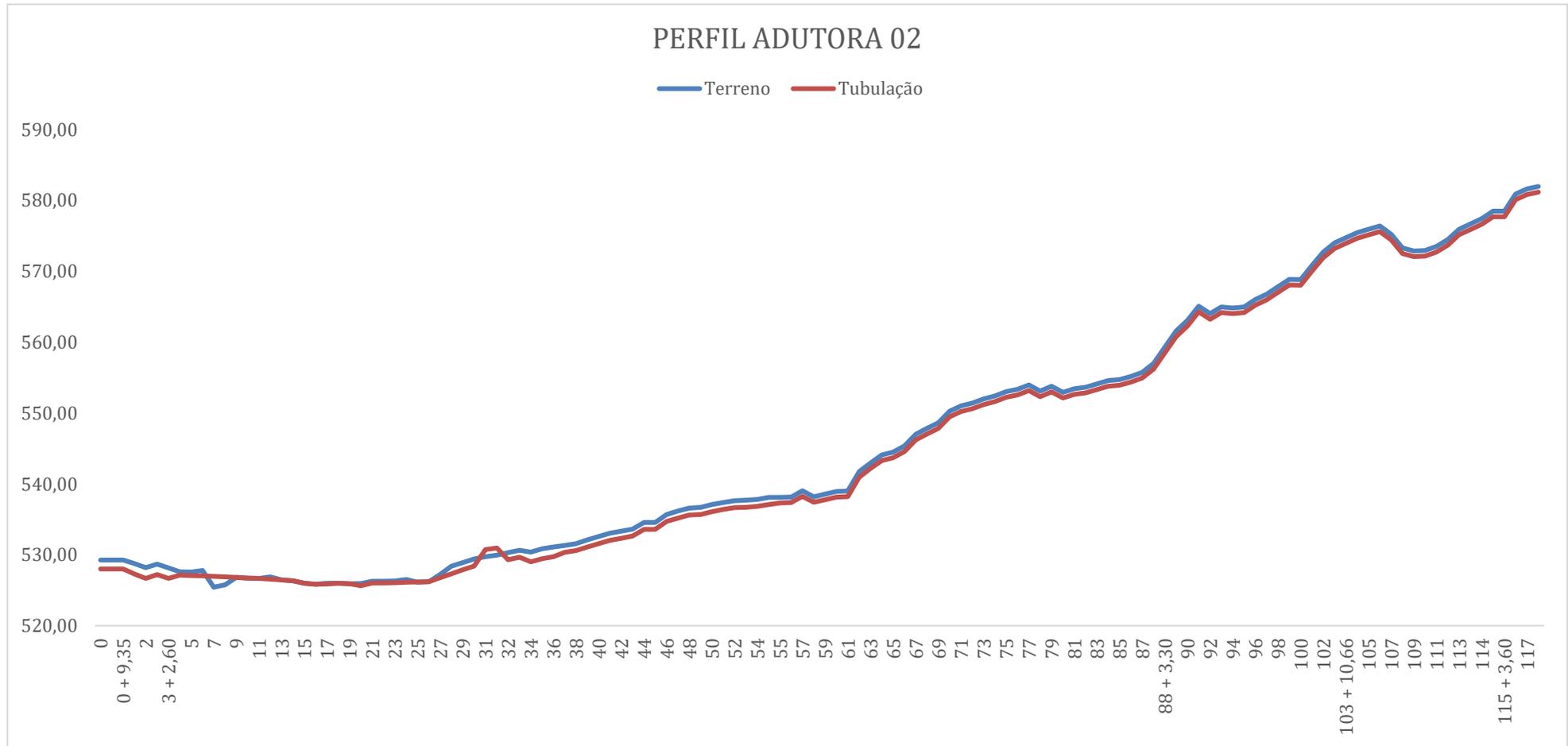
O Apêndice C é conjugado ao Apêndice D, que apresenta os dados de cotas das tubulações, do terreno, diâmetro, profundidade e observações como a identificações de pontos com conexões, obedecendo o estaqueamento determinado no Apêndice C. O perfil geral das adutoras pode ser observado nas figuras 6 e 7, enquanto a elevação por trecho é apresentada no Apêndice C. Dessa forma, a topografia é considerada nos estudos de transiente.

Figura 8 - Perfil de elevação de terreno e tubulação da Adutora 1



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 9 - Perfil de elevação de terreno e tubulação da Adutora 2



Fonte: Autoria própria (2021)

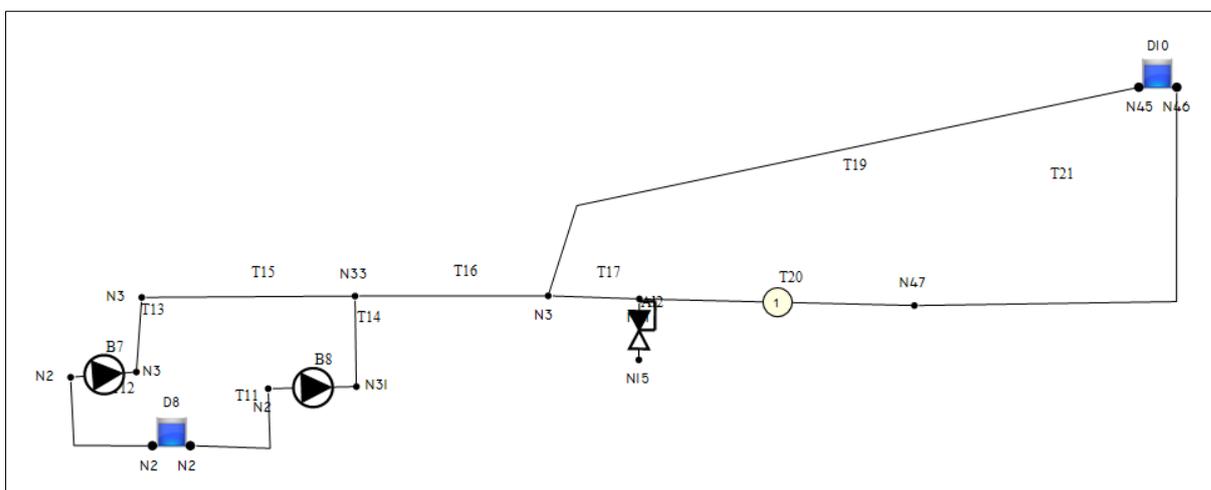
Para considerar a operação normal das adutoras, a partir de entrevista com os funcionários das equipes de operação de água e manutenção de redes foi possível determinar as rotinas de trabalho e as regras de operação da unidade. Foi aplicado o questionário constante no APÊNDICE E – Rotina de Operação (pg. 84), que também apresenta as respostas obtidas.

Os Anexos A e B foram diretamente fornecidos pela Concessionária e apresentam os dados disponíveis das bombas instaladas na EEAB e da válvula de alívio instalada na caixa de manobras da EEAB, respectivamente. Esses dados foram incluídos na simulação apresentada no item a seguir.

#### 4.2 SIMULAÇÃO HIDRÁULICA REGIME TRANSIENTE

A simulação ocorreu no *software* Allievi, como já mencionado e apresentado na metodologia deste mesmo documento. Foram incluídas as instalações da EEAB, tubulações e dispositivos contra golpe já instalados. A rugosidade foi adotada de acordo com a literatura considerando os materiais e o tempo estimado de instalação. A figura a seguir apresenta a topologia da simulação, ou seja, o desenho esquemático do objeto de estudo:

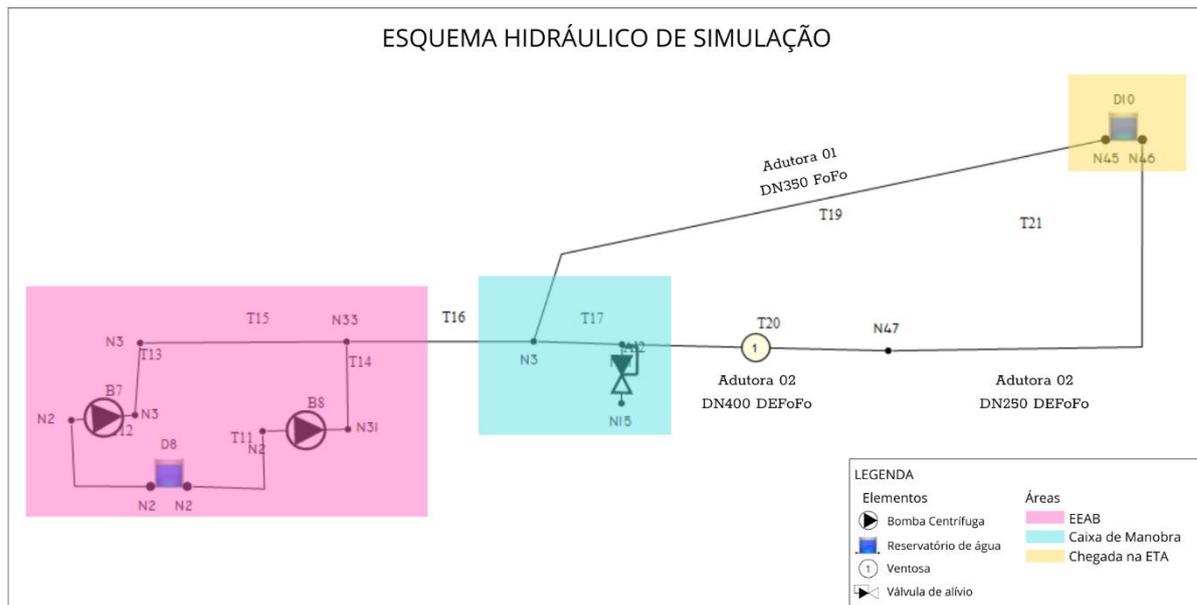
Figura 10 - Topologia geral da simulação



Fonte: Autoria própria (2021)

Já a Figura 11 traz a identificação de cada elemento representado assim como seus locais de instalação.

Figura 11 - Topologia da Simulação com identificação de elementos



Fonte: Autoria própria (2021)

O lançamento de dados ocorreu da seguinte forma:

- Inserção do Reservatório “D8” como método de simulação do poço de sucção da EEAB. O reservatório possui duas saídas, uma para cada bomba em operação;
- Inserção das tubulações de sucção das bombas com nó de entrada;
- Inserção das bombas B7 (BOM.CEN.0003) e B8 (BOM.CEN.0002);
- Inserção dos trechos de tubulação do barrilete (T13, T14, T15 e T16) até a caixa de manobra;
- Inserção dos elementos da caixa de manobra. A derivação pela Junção Y é representada no nó N3;
- Inserção da Adutora 1 (T19);
- Inserção da Adutora 2. A Válvula de alívio instalada está representada com o elemento N15, na tipologia do Allievi de “Estruturas de Controle de Vazão” e associada ao trecho de tubulação T17 devido ao diâmetro de 500mm (que é diferente dos demais diâmetros da adutora). A Ventosa está representada pela simbologia ①, de nó. Os trechos de tubulação foram separados entre T20 (trecho DN400) e T21 (trecho DN250);

A tabela a seguir apresenta os dados inseridos em cada tipo de elemento:

Quadro 6 - Dados inputados por elemento da simulação

Elemento	Dados Inputados	Fonte
Reservatório	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cota de Fundo (<math>Z_s</math>) – metros</li> <li>- Conta de nível da água (<math>Z_0</math>) – metros</li> </ul>	Projeto <i>As Built</i> da Captação
Bombas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cota de eixo (<math>Z</math>) – metros</li> <li>- Existência de Válvula de Retenção</li> <li>- Frequência de rotação (rpm)</li> <li>- Potência (kW)</li> <li>- Altura Manométrica (mca)</li> <li>- Vazão (l/s)</li> </ul>	Projeto <i>As Built</i> da captação Cadastro Eletromecânico das bombas
Tubulação	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cota da geratriz inferior inicial (<math>Z_i</math>)</li> <li>- Conta da geratriz inferior final (<math>Z_f</math>)</li> <li>- Diâmetro interno (mm)</li> <li>- Espessura (mm)</li> <li>- Celeridade (m/s)</li> <li>- Rugosidade (mm)</li> <li>- k</li> </ul>	Perfis longitudinais das adutoras
Válvula de Alívio	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cota de assentamento (<math>Z</math>)</li> <li>- Diâmetro (mm)</li> <li>- K ramal</li> <li>- Tipo</li> <li>- Setpoint de abertura (90mca estimado)</li> </ul>	Projeto <i>As Built</i> da captação

Fonte: Autoria própria (2021)

O Allievi possui a funcionalidade de simulações em cenários, o que permite a avaliação de mais de uma configuração ou situação do sistema, incluindo alterações de topologia. Para a obtenção dos resultados foram simulados os cenários descritos a seguir:

- **CENÁRIO 1:** cálculo com as duas bombas funcionando e sofrendo parada;
- **CENÁRIO 2:** cálculo com uma bomba funcionando e sofrendo parada.

O transiente hidráulico ocorre quando é simulada a parada das bombas. Os resultados são apresentados em forma de envoltória tanto sob a perspectiva da variação da altura piezométrica quanto das pressões. Essa envoltória é 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 e;
- Linha limite de cavitação.

Cada simulação foi executada com o tempo de 100 segundos, o que implicou em tempo de computação de dados por parte do Allievi de cerca de 2h por simulação, devido a densidade de iterações e cálculos numéricos inerentes ao método das características.

Em ordem a manter a organização do estudo do sistema adutor no raciocínio lógico de diagnóstico e prognóstico, primeiro apresentam-se os resultados para os dois cenários de avaliação com a topologia do sistema atualmente em operação. Posteriormente, apresentam-se os resultados relativos ao Prognóstico. Com efeito, os gráficos de envoltórias estão nos itens 4.3 DIAGNÓSTICO e 4.4 PROGNÓSTICO, respectivamente.

### 4.3 DIAGNÓSTICO

A fase de diagnóstico procura estudar o estado atual da operação do Sistema Adutor. A partir dos resultados da simulação foi possível determinar quais os efeitos que o transiente hidráulico causa nas tubulações e se esses são prejudiciais. O tipo de prejuízo é apresentado de acordo com a classificação de Davis (2010) mencionada no item 2.2 TRANSIENTE HIDRÁULICO, onde as falhas podem ser de curto ou médio e longo prazo.

Resumidamente, as falhas de curto prazo seriam relacionadas aos rompimentos ditos catastróficos (repentinos) e movimentação de conexões, comumente associadas a pressões máximas muito altas, acima da capacidade de resistência do material. Já as falhas de médio e longo prazo estão relacionadas ao desgaste da tubulação e a criação de fissuras.

A seguir, apresentam-se os resultados de cada adutora para ambos os cenários de simulação, assim como os respectivos diagnósticos.

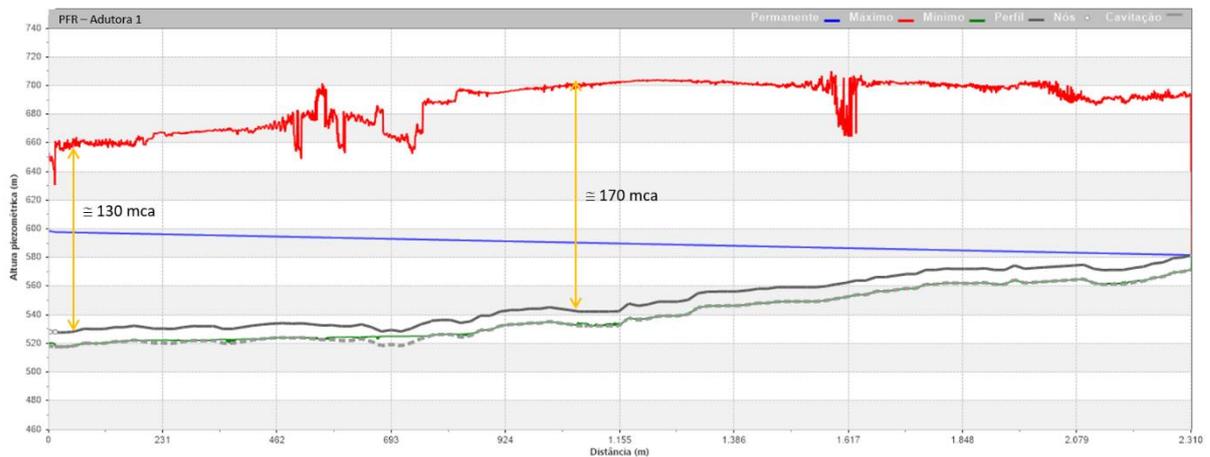
#### 4.3.1 Adutora 1

A adutora 1, de DN350 e material Ferro Fundido é a mais antiga e não possui qualquer tipo de dispositivo de controle de transiente em toda a sua extensão. Para o escopo deste estudo foi avaliado, como mencionado anteriormente, o efeito do regime

transiente quando ocorre a parada das bombas da captação. A seguir, os gráficos de resultados.

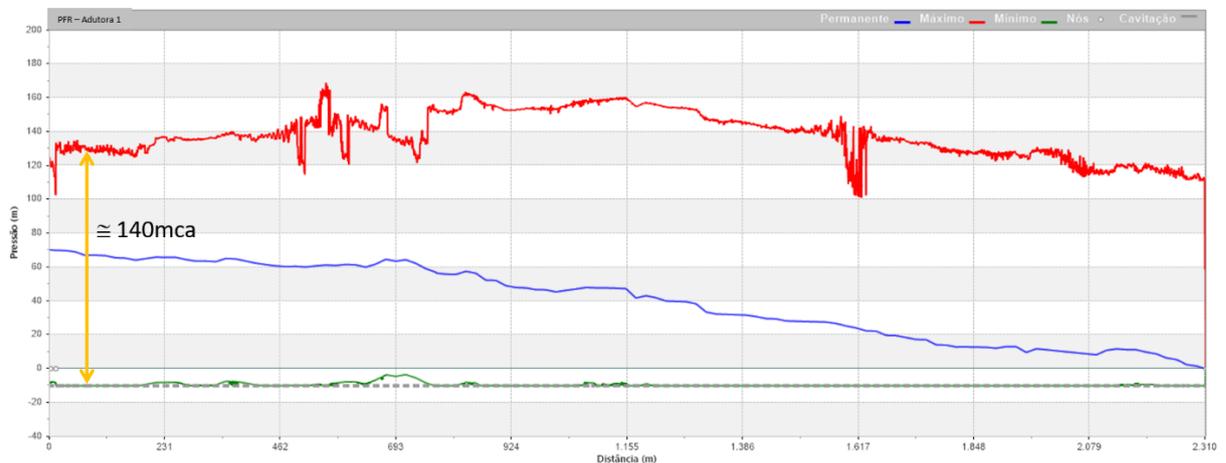
### CENÁRIO 01 – DUAS BOMBAS EM OPERAÇÃO

Figura 12 – Envoltória das alturas piezométricas máximas e mínimas da Adutora 1 na atual operação (sem proteção), cenário 1



Fonte: A autoria própria (2021)

Figura 13 – Envoltória das pressões máximas e mínimas da Adutora 1 na atual operação (sem proteção), cenário 1



Fonte: A autoria própria (2021)

Observa-se que as pressões máximas atingidas estão variando de 130mca a 170mca, atingindo um pico de 170mca no trecho referente à estaca 26 (aproximadamente 520m). De acordo com o catálogo técnico da Saint Gobain, fabricante de tubulações conceituada tecnicamente, a Pressão Máxima de Serviço (PMS) – definida como a pressão interna máxima, incluindo o golpe de aríete, que um componente pode suportar em serviço - de uma tubulação de Ferro Fundido DN 350

PN10 é de 1,2 Mpa (SAINT-GOBAIN, 2015), ou seja, aproximadamente 120mca.

Com esse resultado, as pressões máximas da tubulação estariam com um excedente de pressão de aproximadamente 42% no pico e de 33% na média do transiente em relação a capacidade de fabricação do material.

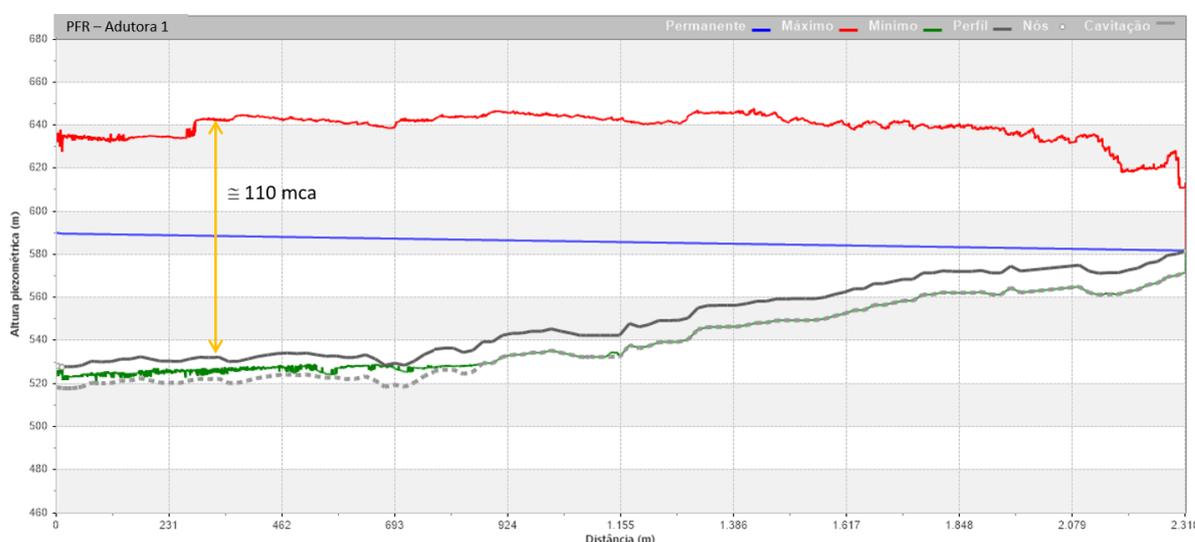
Já em relação às pressões mínimas, o critério de análise é o limite de cavitação, representada pela linha tracejada cinza nas envoltórias. Esse fator é crucial porque a cavitação causa a transformação da água em vapor causando sério desgaste à tubulação. Esse é o efeito das chamadas pressões negativas.

Nota-se que praticamente em todos os 2.310m da adutora as pressões mínimas se encontram na linha de cavitação, com exceção do ponto próximo à estaca 34, onde o terreno possui um rebaixamento. Esse resultado indica um comportamento destrutivo da água em relação à adutora quase que constante.

Ademais, a variação de pressão entre máxima e mínima de aproximadamente 140mca entre ondas de alta e baixa pressão é preocupante pois essa variação de pressões causa esforços nas conexões e em possíveis fissuras, resultando em vazamentos. Apesar do material de Ferro Fundido ser o mais resistente esse tipo de variação, resistindo inclusive ao aumento e redução de orifícios (fissuras), essa grande variação é prejudicial ao desempenho da tubulação.

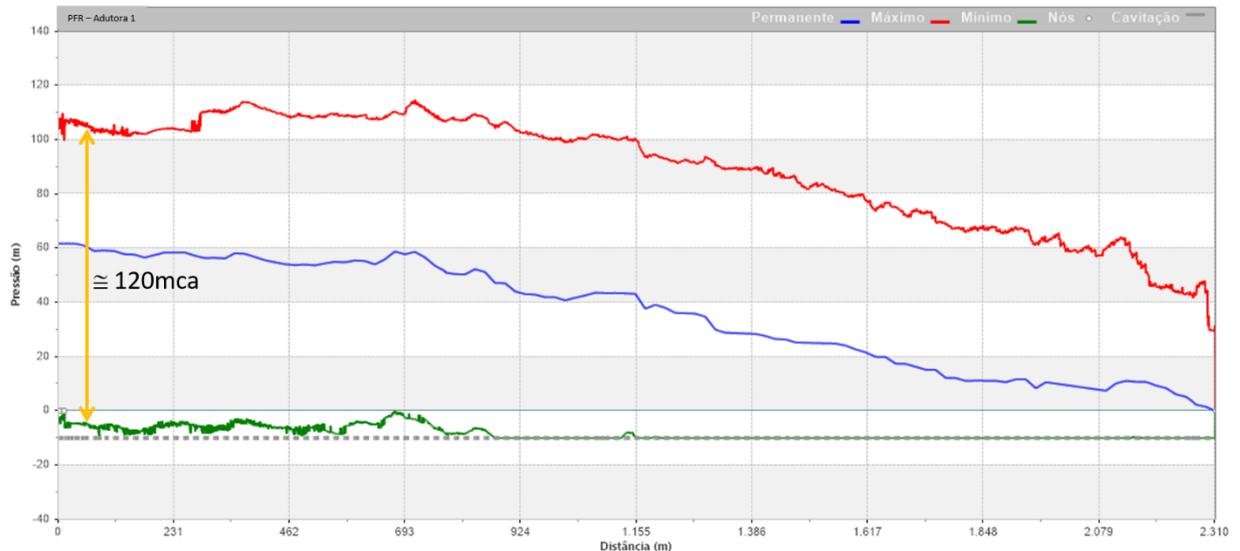
## CENÁRIO 02 – UMA BOMBA EM OPERAÇÃO

Figura 14 - Envoltória das alturas piezométricas máximas e mínimas da Adutora 1 na atual operação (sem proteção), cenário 2



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 15 - Envoltória das pressões máximas e mínimas da Adutora 1 na atual operação (sem proteção), cenário 2



Fonte: Autoria própria (2021)

Quanto ao cenário 2, onde apenas uma bomba está em operação e faz a parada, a variação de pressão é um pouco menor, atingindo pressões máximas com picos de 115mca e mínimas de -5mca, atingindo até -10mca. A variação média das pressões ao longo da adutora é de 120mca. Salienta-se que o cenário 2 é o da operação mais comum na EEAB, sendo esse com probabilidade maior de ocorrência.

Em relação ao limite de pressões máximas de serviço, a adutora estaria dentro da faixa de operação nas pressões máximas. Todavia, as pressões mínimas são preocupantes visto que novamente essas atingem a linha de cavitação apesar de agora ocorrer apenas no trecho após a estaca 43 (aproximadamente 870m) da tubulação.

## DIAGNÓSTICO ADUTORA 1

Em ambos os cenários a adutora 1 apresentou uma grande variação de pressões com picos altos nas pressões máximas e muito próximos do limite de cavitação nas pressões mínimas. Entretanto, é importante salientar que o fenômeno de transiente hidráulico possui como característica essa grande variação de pressões, inclusive com histórico de ocorrências de picos mais altos e pressões mínimas mais baixas, a depender das configurações das adutoras, como é inclusive apontado nos

estudos de Messias (2017).

Quanto às pressões máximas, apesar do pico de pressão estar acima da capacidade do material, a adutora não possui histórico de rompimentos frequentes com características associadas à parada das bombas da EEAB, o que pode indicar uma certa capacidade resistente do material. Entretanto, essa hipótese deve ser posta à prova através de estudos mais aprofundados, inclusive do estado físico da tubulação, para que a determinação de risco seja mais assertiva.

Neste caso, o fenômeno de cavitação é especialmente preocupante visto que pode causar a formação do efeito de separação de coluna líquida, o que potencializa as ondas de choque.

Com efeito, os transitórios são considerados **NÃO ACEITÁVEIS** de acordo com a metodologia adotada de avaliação do fenômeno, tanto para pressões máximas quanto para pressões mínimas.

De forma a orientar o prognóstico subsequente apresenta-se a seguir a definição da criticidade dos riscos do estudo de acordo com a matriz GUT. Aqueles com GUT acima de 16 necessitam de atenção especial.

Tabela 2 - Matriz de criticidade GUT para Adutora 1

CENÁRIO	Pressão	Gravidade	Urgência	Tendência	GUT
2	Máxima	1	1	3	3
	Mínima	4	3	2	24

Fonte: A autoria própria (2021)

Conclui-se neste diagnóstico que para a Adutora 1 são cruciais ações de controle das pressões mínimas, estando as pressões máximas em segundo lugar (apesar de amplamente importante), principalmente no cenário 1.

#### 4.3.2 Adutora 2

A adutora 2 possui uma estrutura mais robusta possuindo dois trechos de diâmetros diferentes, um DN 400 e DN 250, ambos em PVC DEFoFo. Além disso existem dois dispositivos de segurança contra golpe de aríete: uma válvula de alívio e uma ventosa de tríplex função.

Assim como a avaliação da adutora 1, o estudo do efeito do regime transiente quando ocorre a parada das bombas da captação. A seguir, os gráficos de resultados.

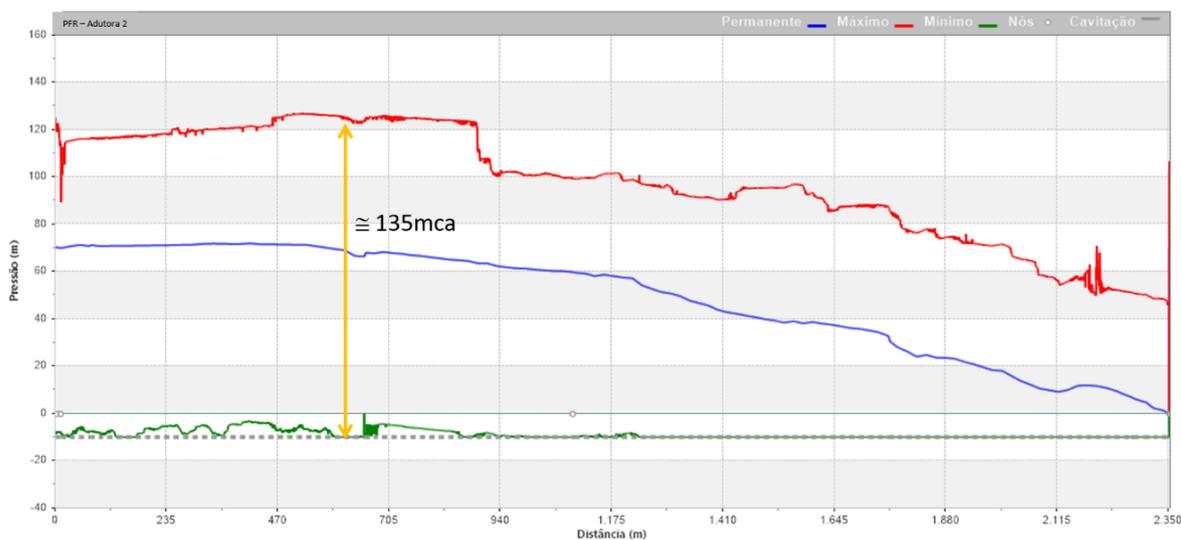
## CENÁRIO 01 – DUAS BOMBAS EM OPERAÇÃO

Figura 16 – Envoltória das alturas piezométricas máximas e mínimas da Adutora 2 na atual operação (sem proteção), cenário 1



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 17 - Envoltória das pressões máximas e mínimas da Adutora 2 na atual operação (sem proteção), cenário 1



Fonte: Autoria própria (2021)

Observa-se que as pressões máximas atingidas estão próximas a 125mca até o trecho próximo à estaca 44 (cerca de 880m). Interessante apontar que na envoltória das pressões máximas a curva possui um degrau justamente próximo a estaca 44, um efeito do choque entre as ondas de pressões máximas e mínimas.

A partir desse ponto, as pressões máximas decaem para um patamar de

100mca, enquanto as mínimas atingem o limite de pressão negativa causando o efeito de cavitação. Esse trecho de cavitação é aquele com diâmetro de DN 250m, ou seja, após o estrangulamento da tubulação. Entretanto, é importante apontar que as pressões mínimas ficam perigosamente próximas ao limite da linha da cavitação mesmo no trecho de DN400.

É importante apontar aqui o papel da ventosa que consegue causar um leve descolamento da linha de pressões mínimas da linha de cavitação no trecho a jusante de sua instalação, evitando, assim, efeitos mais adversos, apesar de ser um efeito de curto impacto na configuração do cenário 1.

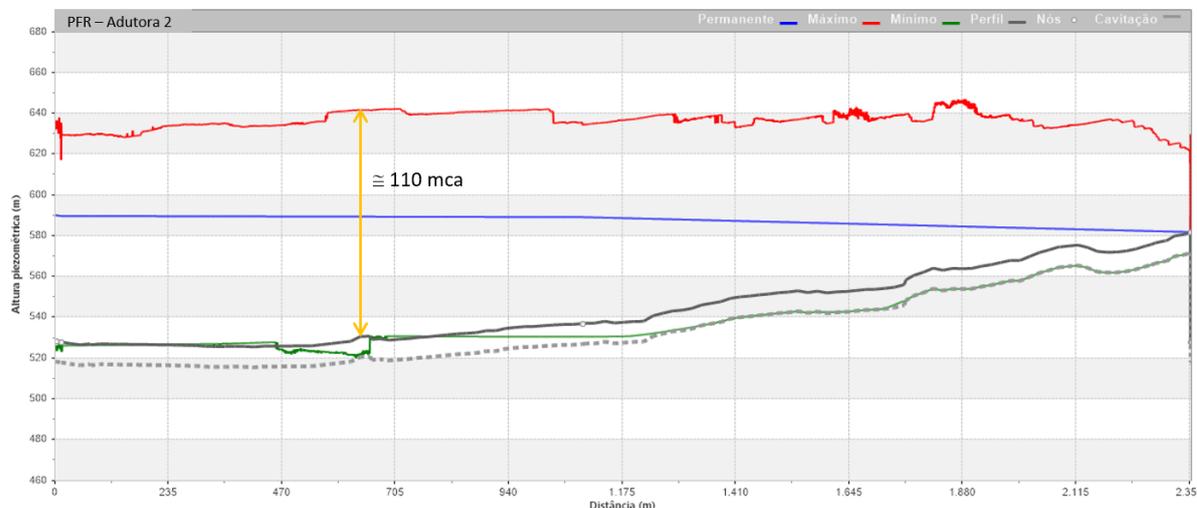
O PVC DEFoFo é um material não tão resistente a altas pressões quanto o Ferro Fundido (como apontado no item 2.4 MEDIDAS MITIGADORAS). De acordo com o catálogo técnico da Tigre, outra fabricante de tubulações conceituada tecnicamente para PVC DEFoFo, a Pressão Máxima de Serviço (PMS) – definida como a pressão interna máxima, incluindo o golpe de aríete, que um componente pode suportar em serviço - de uma tubulação é de 1,0 Mpa (TIGRE, 2021), ou seja, aproximadamente 100mca.

Com esse resultado, em termos de pressões máximas, a tubulação estaria com um excedente de pressão de aproximadamente 25% no pico se colocando no limiar de 100mca nos demais trechos, estando, portanto, no limite.

Por fim, a variação de pressão de cerca de 135mca entre ondas de alta e baixa pressão é preocupante, assim como na adutora 1. Entretanto, para PVC DEFoFo, essa variação causa mais vazamentos e perdas pela maior elasticidade do material, o que tende a aumentar possíveis fissuras e orifícios existentes.

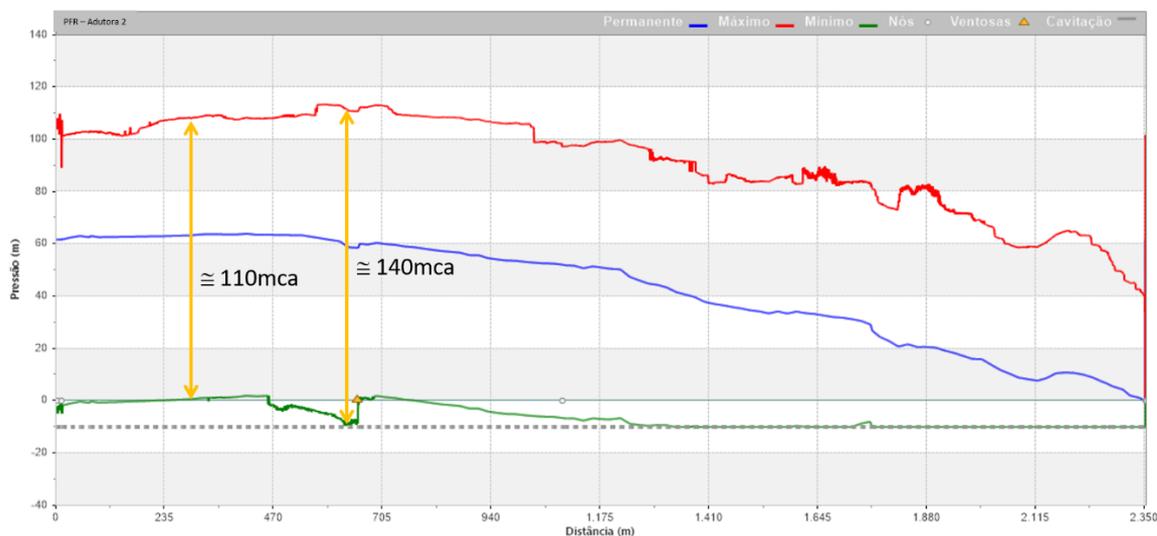
## CENÁRIO 02 – UMA BOMBA EM OPERAÇÃO

Figura 18 – Envoltória das alturas piezométricas máximas e mínimas da Adutora 2 na atual operação (sem proteção), cenário 2



Fonte: Aatoria (2021)

Figura 19 - Envoltória das pressões máximas e mínimas da Adutora 2 na atual operação (sem proteção), cenário 2



Fonte: Aatoria própria (2021)

No cenário 2, assim como no comportamento da adutora 1, a adutora 2 atinge pressões máximas pouco menores, agora próximo aos 110mca. Essa pressão está 10% acima da capacidade técnica do material da tubulação, o que configura um risco ao sistema.

Já a linha de pressões mínimas se descola mais do limite de cavitação na primeira metade da adutora, quando comparado ao comportamento do cenário 1,

apesar de atingir o pico de -10mca no trecho logo anterior à ventosa.

Destaca-se a ação da ventosa nesse caso, onde o funcionamento do equipamento controla parte da queda de pressão mantendo a envoltória acima da linha de cavitação por um trecho mais longo do que o apresentado no cenário 1. Sua remoção ou falha de funcionamento acarretaria em pressões negativas mais próximas da cavitação, o que afeta negativamente o desempenho da tubulação.

Como o cenário 2 é o da operação mais comum na EEAB, é importante a manutenção e vistoria do equipamento, fator que foi evidenciado em visitas de campo e pelas rotinas de operação informadas e apresentadas no APÊNDICE E – Rotina de Operação.

## **DIAGNÓSTICO ADUTORA 2**

Assim como na adutora 1, em ambos os cenários foi identificada uma grande variação de pressões com picos altos nas pressões máximas e muito próximos do limite de cavitação nas pressões mínimas.

As pressões máximas, apesar de ultrapassarem apenas 10% da capacidade do material, devem ser avaliadas. Entretanto, não há histórico de rompimentos repentinos nesta adutora, o que pode indicar uma boa capacidade de suporte de pressões máximas desta. Para que isso seja validado a hipótese deve ir a campo e os estudos mais aprofundados, assim como já foi apontado no diagnóstico da Adutora 1.

Apesar de as pressões mínimas não atingirem tão constantemente a linha de cavitação por a subpressão não ter toda magnitude suficiente para atingir a pressão de vapor da água, isso ainda ocorre, e como já estabelecido anteriormente tanto pela literatura quanto no diagnóstico já apresentado da adutora 1, é crucial que esse efeito seja controlado para que o desempenho da adutora seja mantido e a possibilidade de aumento de perdas e de vazamentos seja reduzida.

Em conclusão, os transitórios são considerados **NÃO ACEITÁVEIS** de acordo com a metodologia adotada de avaliação do fenômeno, tanto para pressões máximas quanto para pressões mínimas.

De forma a orientar o prognóstico subsequente apresenta-se a seguir a definição da criticidade dos riscos do estudo de acordo com a matriz GUT. Aqueles com GUT acima de 16 necessitam de atenção especial.

Tabela 3 - Matriz de criticidade GUT para Adutora 2

CENÁRIO	Pressão	Gravidade	Urgência	Tendência	GUT
1	Máxima	2	2	3	12
	Mínima	3	3	2	18
2	Máxima	1	1	3	3
	Mínima	2	3	2	12

Fonte: Autoria própria (2021)

Com efeito, é crucial que as pressões mínimas sejam controladas, estando essas com uma criticidade superior.

#### 4.3.3 Sistema Adutor

As duas adutoras em estudo fazem parte de um sistema só e estão conectadas, de forma que uma influencia a outra. É perceptível, inclusive, que a faixa de variação de pressão entre elas não difere de forma muito extrapolada, até mesmo quando comparados os mesmos cenários para adutoras diferentes. Importante apontar essa semelhança considerando que as adutoras possuem diâmetros e materiais diferentes.

Por outro lado, a adutora 2 possui dois equipamentos de combate a golpe de aríete, enquanto a adutora 1 não possui nenhum. Essa mudança de configuração deveria causar comportamentos diferentes. Entretanto, os materiais tem grande influência sobre os resultados observados, tendo em vista que, de acordo com a literatura, o Ferro Fundido tem mais resistência às variações de pressão por si só do que o PVC DEFoFo. É preciso também levar em consideração que o sistema sempre busca pelo equilíbrio em todos os seus componentes.

Em resumo, o sistema adutor como um todo possui deficiência de resposta às pressões máximas e mínimas, sendo as mínimas mais preocupantes pois além de se colocarem em valores negativos, estas atingem o limite da cavitação. Esse fenômeno de vaporização da água por levar a formação da chamada separação de coluna líquida, que ao voltar a se unir causa mais ondas de choque o que potencializa os efeitos das pressões máximas, dado que o fenômeno é cíclico até a dissipação.

É importante também pontuar que o sistema não está sendo capaz de controlar a grande variação de pressão o que prejudica a estrutura, reduzindo seu tempo de vida e afetando na capacidade de transporte de água das adutoras.

## **CONCLUSÃO: Pressões Mínimas Não Aceitáveis.**

### **4.4 PROGNÓSTICO**

O prognóstico segue a metodologia proposta por Boulos *et al.* (2005) em seu fluxograma de análise de transitórios apresentada e detalhada no item 3.4 deste documento.

Pela própria característica do sistema adutor, onde as adutoras estão conectadas e os problemas críticos a serem prioritariamente resolvidos de acordo com a criticidade GUT serem os mesmos, a proposta adotada visa uma solução para todo o sistema, de forma a utilizar da melhor técnica com menor ônus operacional.

O ponto de partida é a melhoria do desempenho do sistema utilizando o que já está instalado, procurando reduzir a possibilidade de grandes interferências. Deste modo, mantém-se os dispositivos já instalados – Válvulas de retenção das saídas das bombas, Válvula de Alívio de pressão e Ventosa de tríplice função -.

Para a Válvula de alívio, indica-se a instalação de uma segunda válvula no local já disponível na caixa de manobra e anteriormente previsto em projeto executivo. Essa inclusão justifica-se pela boa prática em manter equipamentos sobressalentes como método de mitigação de riscos operacionais.

Disto, inicia-se a descrição do processo de determinação de mecanismo anti-golpe com base no fluxograma disposto na Figura 7 (pg. 35). As questões propostas são respondidas abaixo:

*a. Os transitórios podem ser modificados?*

Não. Não é possível a alteração das velocidades de operação.

A opção de instalação de volante de inércia foi dispensada pelos altos custos e a robustez necessária em relação a aumento da corrente elétrica demandada e da potência da bomba, como é apontado por Gusmão (2019) . A opção de instalação de um gerador é viável e será proposta como medida de contingência para a segurança do sistema como um todo. Entretanto, avança-se no fluxograma de análise em busca de soluções que configurem um plano de melhoria.

*b. O sistema pode ser modificado?*

Não é interessante para o Sistema que o *layout* das tubulações seja alterado apenas para controle de transiente, posto que as adutoras atuais, em conjunto, atendem de forma satisfatória a demanda do SAA. Ademais, essas soluções

possuem longo tempo de execução e efeito em outros aspectos além do transitório (como a capacidade de transporte, por exemplo). Para esse tipo de proposição, considerando o risco associado ao sistema, são necessários mais estudos no campo da modelagem hidráulica da vazão e pressão e dos impactos em obras na região por onde passam as adutoras.

*c. Dispositivos de segurança podem ser utilizados?*

Sim. Essa solução nesse momento é a mais adequada porque possui melhores garantias de resolução das problemáticas enfrentadas, sob o aspecto hidráulico e da própria operação.

*d. A pressão sobe ou reduz primeiramente?*

De acordo com os resultados de ondas do Allievi as pressões primeiro decaem. Temos ainda que as pressões mínimas foram consideradas mais críticas no diagnóstico de acordo com o coeficiente de criticidade GUT. Para isso a literatura e as experiências técnicas de projeto indicam uma série de soluções que vão desde a instalação de ventosas em série, tanques hidropneumáticos e chaminés de equilíbrio (GUSMÃO, 2019). Cada tipo de dispositivo possui suas vantagens e desvantagens nos aspectos hidráulicos, econômicos e operacionais. A partir deste momento, fez-se uma avaliação dos métodos já apresentados no item 2.4 MEDIDAS MITIGADORAS e como eles se aplicam no sistema em estudo.

#### **4.4.1 Determinação do dispositivo de atenuação de onda.**

A Válvula de alívio, apesar de eficiente ao que se propõe, já existe no sistema e mesmo com sua contribuição não foi suficiente para atingir um nível de controle da onda de forma a deixar os transientes aceitáveis. Além disso, esse tipo de dispositivo possui efeito apenas para pressões máximas que não são os problemas mais críticos encontrados, não interferindo no problema de cavitação (MENDES, 2011).

O sistema atual possui já instalada uma ventosa de tríplice função, que consegue fazer tanto a admissão quanto a expulsão do ar em tubulações, dando suporte no controle da onda de celeridade. Essa solução é indicada em locais de topografia elevada sendo um dispositivo de ação importante, embora pontual (SERDAN; SILVA, 2012). Tendo em vista que o objetivo deste prognóstico é ofertar uma solução sistêmica, dispensa-se a instalação de mais ventosas.

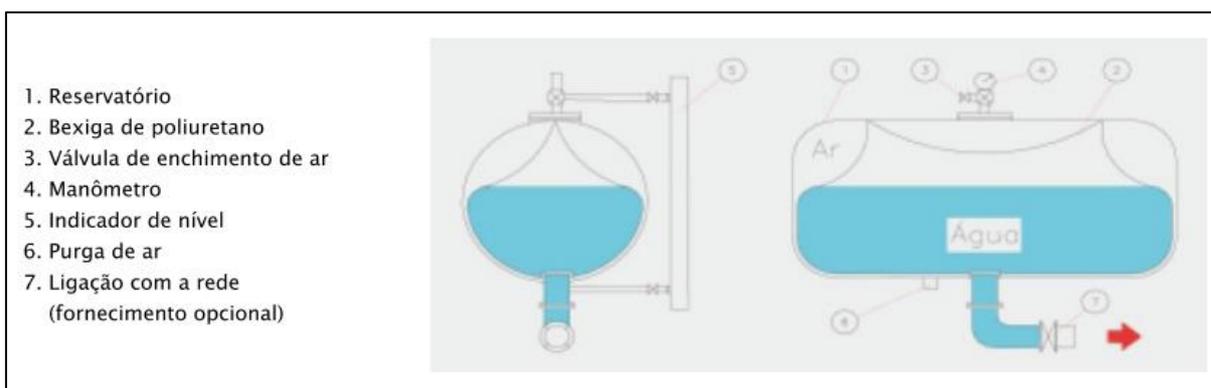
Com efeito, as soluções de chaminés de equilíbrio, tanques hidropneumáticos

e atenuadores de celeridade se colocam como mais eficientes. A primeira solução, chaminé de equilíbrio, é dispensada por sua dependência do perfil topográfico e robustez de construção, não se demonstrando uma solução tecnicamente elegante para o sistema estudado (SILVA, 2006).

Restam então as soluções dos tanques hidropneumáticos e dos tubos com atenuadores de celeridade, instrumentos que possuem princípio de funcionamento similar onde as ondas são controladas (para pressões máximas e mínimas) através da compressão e expansão de bexigas de ar, que absorvem as variações de pressão regularizando o comportamento das envoltórias.

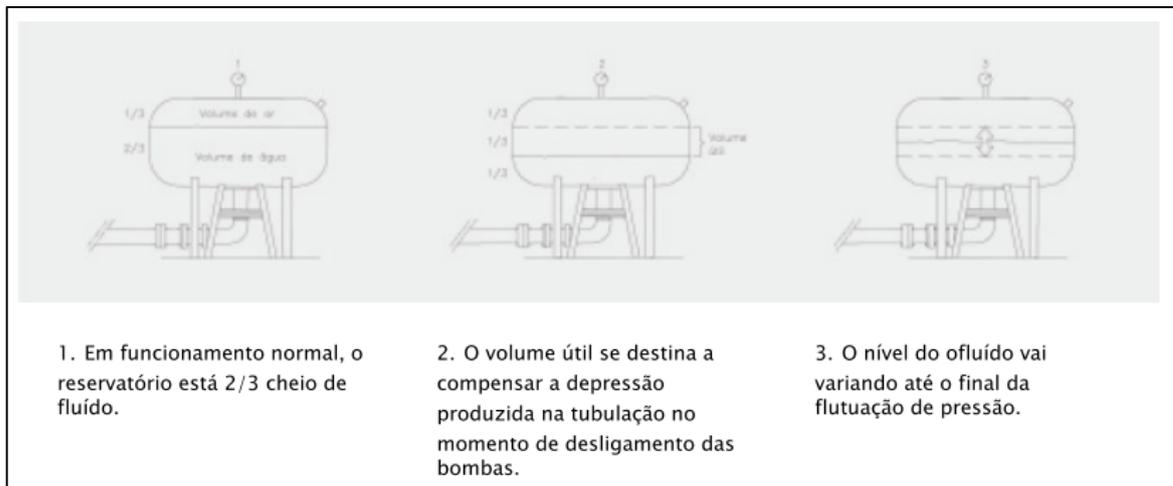
Os tanques hidropneumáticos (THO) são reservatórios onde o volume é dividido entre ar e água. Essa divisão ocorre através de uma bexiga (que contém o ar ou a água, a depender do fabricante). Com o aumento de pressão a água do tubo é expulsa e encontra saída no reservatório, que expande a sua bexiga e comprime o ar em volta (o ar é um fluido compressível). Quando as pressões negativas criam o vácuo a ar fora da bexiga expande e devolve a água ao tudo. Esse efeito ocorre de forma cíclica e os esforços causados pelas variações de pressões são conduzidos ao reservatório pelo equilíbrio de forças e absorvidos pelo movimento de compressão e expansão da bexiga. As imagens a seguir apresentam os componentes de um THO e seu esquema de funcionamento.

Figura 20 - Componentes de um THO



Fonte: Hydrostec (2021)

Figura 21 - Esquema de funcionamento de um THO

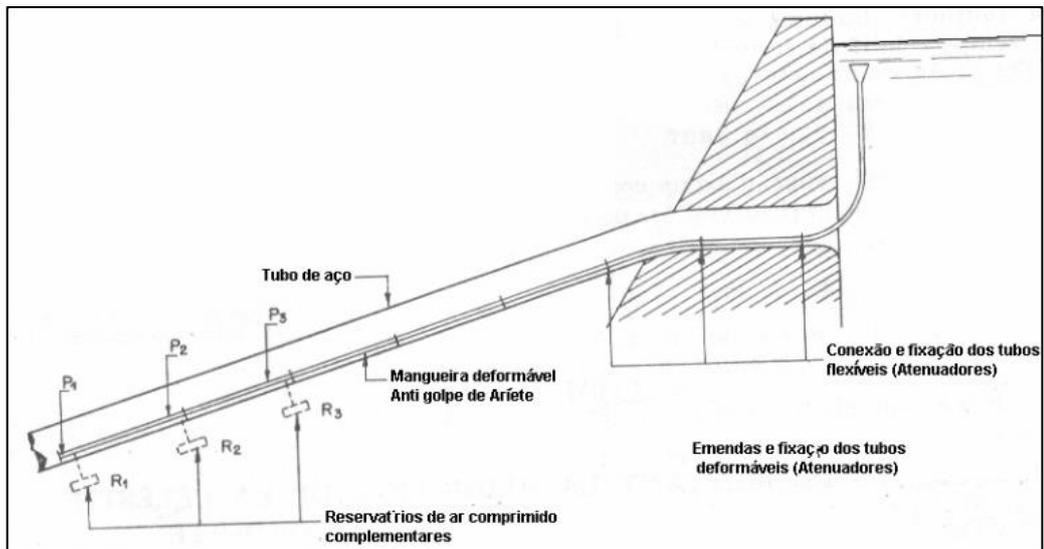


Fonte: Hydrostec (2021)

Apesar de Silva (2006) apontar como principais desvantagens os custos com energia elétrica e manutenção por causa do compressor de ar comprimido, esse equipamento foi suprimido pelas fabricantes atuais e os produtos hoje no mercado dispensam o compressor constante ao utilizar a tecnologia de bexiga de poliuretano (HYDROSTEC, 2021). O equipamento para a ser utilizado apenas para calibração.

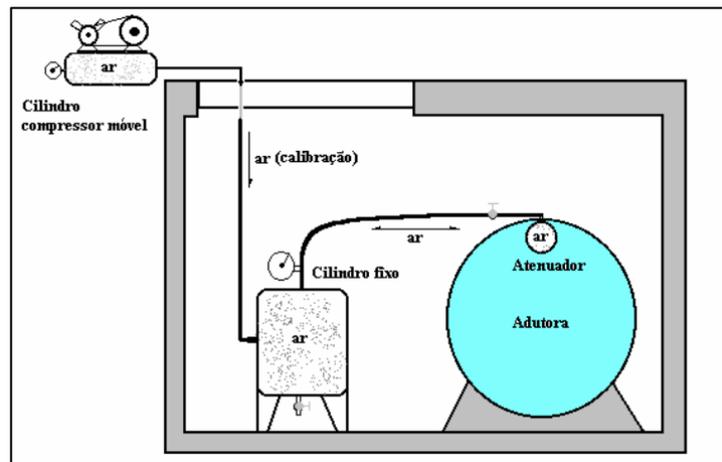
Os tubos atenuadores de celeridade possuem o mesmo princípio de funcionamento, a diferença está na escala de instalação. Os atenuadores são tubos flexíveis de pequeno diâmetro que são instalados ao longo de uma tubulação de transporte de água. Esse tubo é alimentado por pequenos reservatórios de ar comprimido nas estações de calibração. Essa tecnologia desenvolvida por Remenieras (1952) é interessante, de uma tecnologia simples e elegante. As imagens a seguir apresentam o funcionamento do dispositivo.

Figura 22 - Desenho esquemático da instalação de um tubo atenuador de celeridade



Fonte: Remenieras (1952)

Figura 23 - Corte da estação de calibração de um tubo atenuador de celeridade instalado em adutora



Fonte: Silva (2006)

Os estudos de Silva (2006) sobre atenuadores de celeridade instalados em tubos atenuadores apresentam resultados simulados excelentes com a mesma eficiência na atenuação das ondas causadas pelo transiente que os tanques hidropneumáticos. Apesar de mais elegante, a tecnologia não é amplamente utilizada no mercado e denota uma implantação na fase de construção de adutoras novas, o que não é aplicável ao sistema em estudo.

Com efeito, a solução é o **tanque hidropneumático (THO)**.

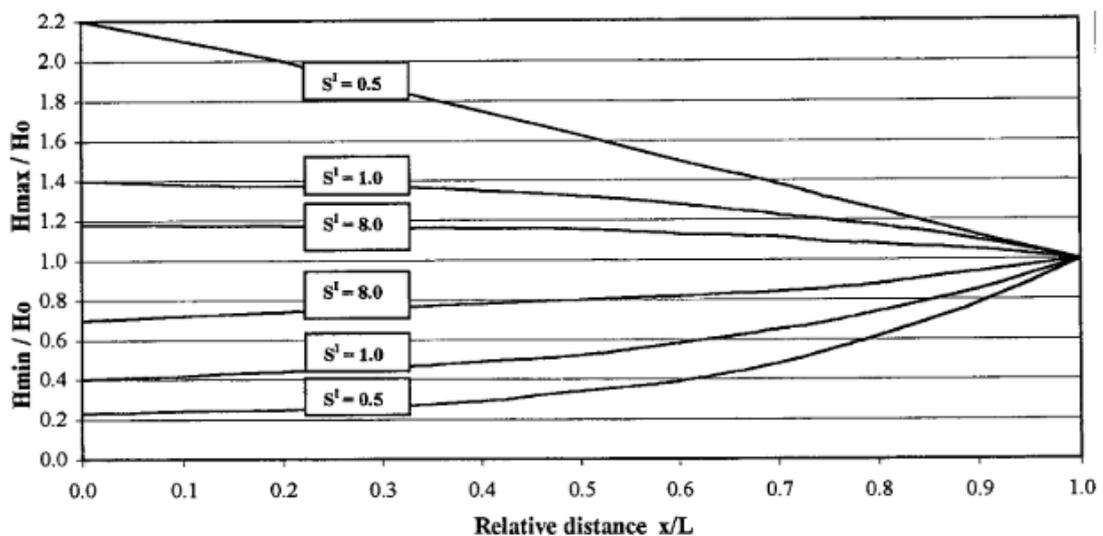
#### 4.4.2 Dimensionamento dos Tanques Hidropneumáticos

Para o dimensionamento do volume do tanque hidropneumático será utilizada

a metodologia proposta por Stephenson (2004). Essa escolha tem como base tanto a consolidação do método na área da Engenharia Hidráulica quanto o estudo de Oliveira e Junior (2019) que comparou 5 metodologias de dimensionamento chegando à conclusão de que Stephenson (2004) é um dos que apresenta melhor resultado atrelando menores volumes e maior conformidade com a realidade.

O método de Stephenson possui duas etapas, sendo uma gráfica e uma de cálculo. A fase gráfica consiste na obtenção do coeficiente  $S'$ , um fator de volume de gás adimensional. Essa obtenção tem como variáveis a altura manométrica mínima na estação de bombeamento ( $H_{\min}$ ) calculada em função da altura manométrica inicial ( $H_0$ ). O ábaco é apresentado abaixo:

Figura 24 - Envoltórias de altura manométrica máxima e mínima usando a teoria do fluxo incompressível



Fonte: Stephenson (2004)

Adotando a premissa de que a variação da altura manométrica deverá ser estabilizada em no máximo 40% acima ou abaixo da altura normal do regime permanente (STEPHENSON, 2004), temos que  $S' = 1,0$ .

A fase de cálculo é dividida em duas etapas que utilizam a mesma equação 4.1 apresentada abaixo. Na primeira fase utiliza-se o  $S'$  para encontrar o volume de ar necessário no THO. Na segunda utiliza-se a proporção 1:2 para determinar o volume total.

$$S' = \frac{S_0 g H_0}{ALV_0^2} \quad (4.1)$$

Onde,

$S'$  é fator do volume de gás adimensional;

$S_0$  é o volume de gás necessário ( $m^3$ );

$g$  é a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );

$H_0$  é a altura manométrica inicial (m);

$A$  é a área da tubulação ( $m^2$ );

$L$  é o comprimento da tubulação (m) e;

$V$  é a velocidade inicial da tubulação (m/s).

Executando esses cálculos para o objeto de estudo tem-se que:

$$S' = 1,0 = \frac{S_0 g H_0}{ALV_0^2} \rightarrow S_0 = \frac{1,0 * 0,44 * 4652 * 1,73^2}{9,81 * 60} = 2,97m^3$$

Logo, o volume total pré-dimensionado é de  $5,94m^3$ .

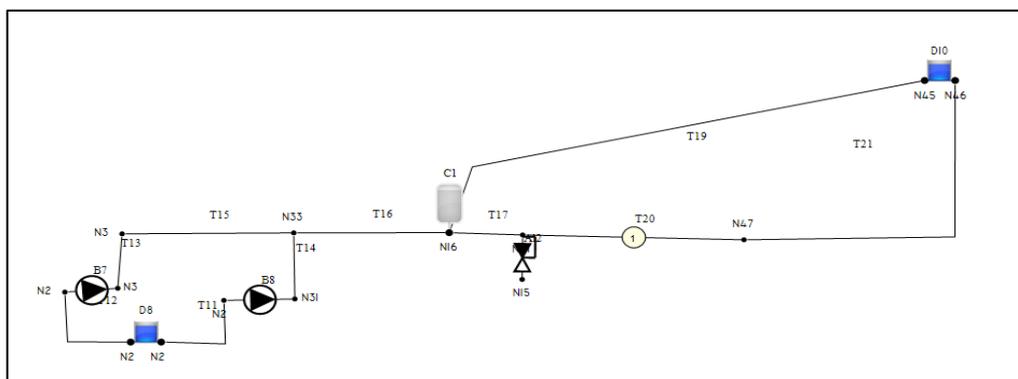
Por questão de segurança foi feita a simulação para  $6m^3$  e  $8m^3$  de THO. Os resultados de  $8m^3$  foram os satisfatórios.

Para a comprovação do dimensionamento foi executada novamente a simulação para todos os cenários de estudo considerando agora a instalação de 2 (dois) tanques hidropneumáticos (THO), com capacidade de  $4m^3$  cada, sendo esse volume dividido quase que igualmente entre água e ar. O item a seguir apresenta os resultados das simulações com os THOs instalados.

#### 4.4.3 Envoltórias das adutoras sob transiente com proteção

A simulação foi refeita para ambos os cenários, com duas bombas em operação e com uma bomba em operação. Aqui o primeiro é renomeado para *Cenário 3 – Duas bombas em operação com THO* e *Cenário 4 – Uma bomba em operação com THO*. A topologia geral da simulação está na figura a seguir:

Figura 25 - Topologia da simulação hidráulica em fase de prognóstico

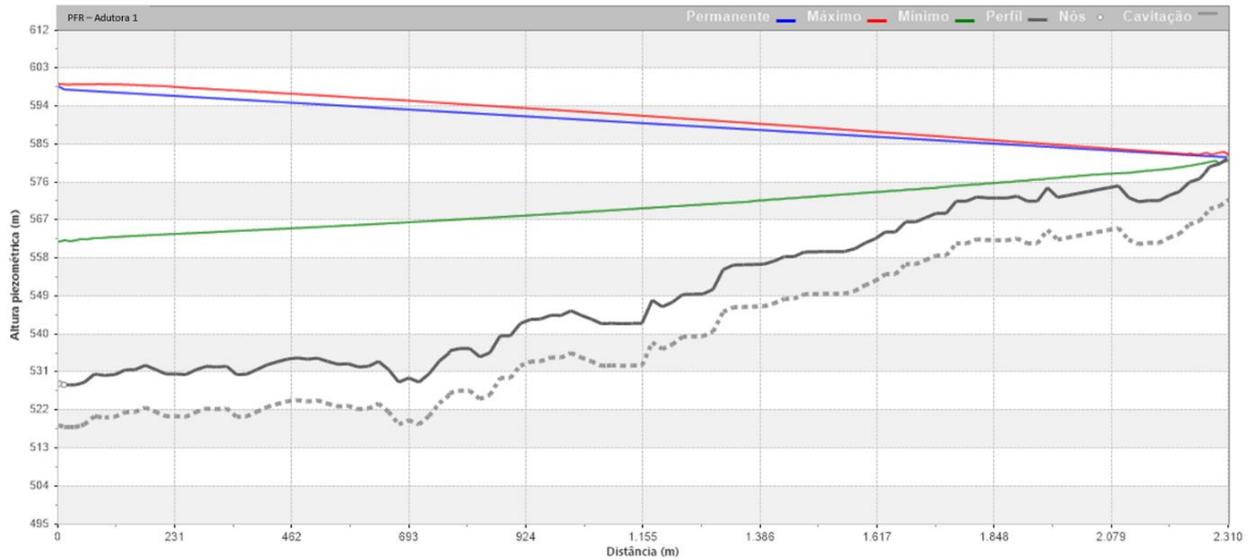


Fonte: Autoria Própria (2021)

Apresentam-se a seguir os resultados de envoltórias para ambas as adutoras, na modalidade de altura piezométrica e pressões, no mesmo formato do Diagnóstico.

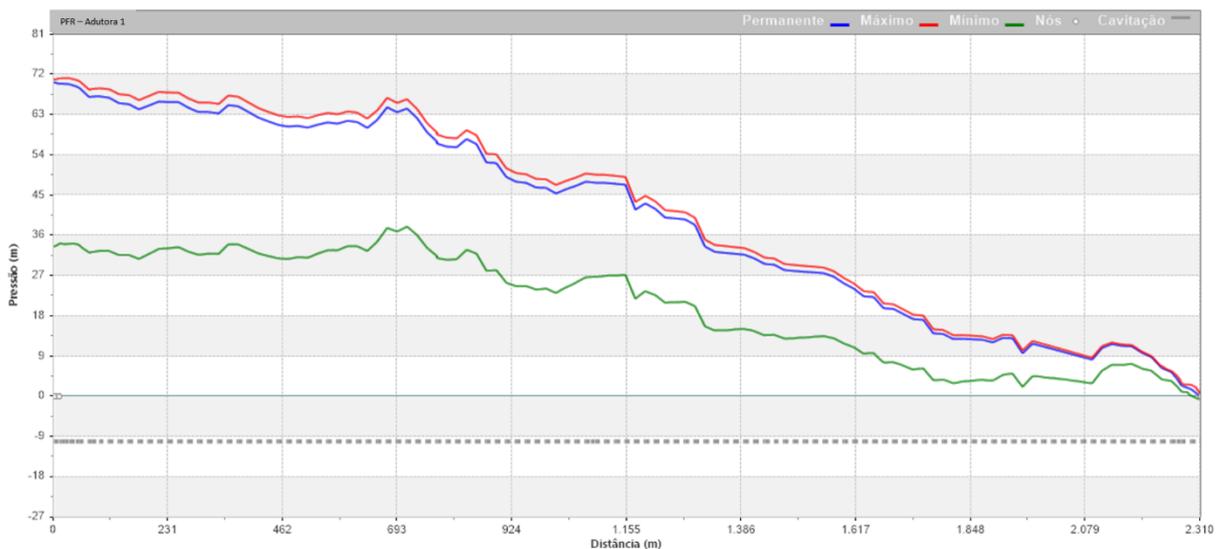
### CENÁRIO 03 – DUAS BOMBAS EM OPERAÇÃO COM THO

Figura 26 - Envoltória das alturas piezométricas máximas e mínimas da Adutora 1 com o THO (com proteção), cenário 3



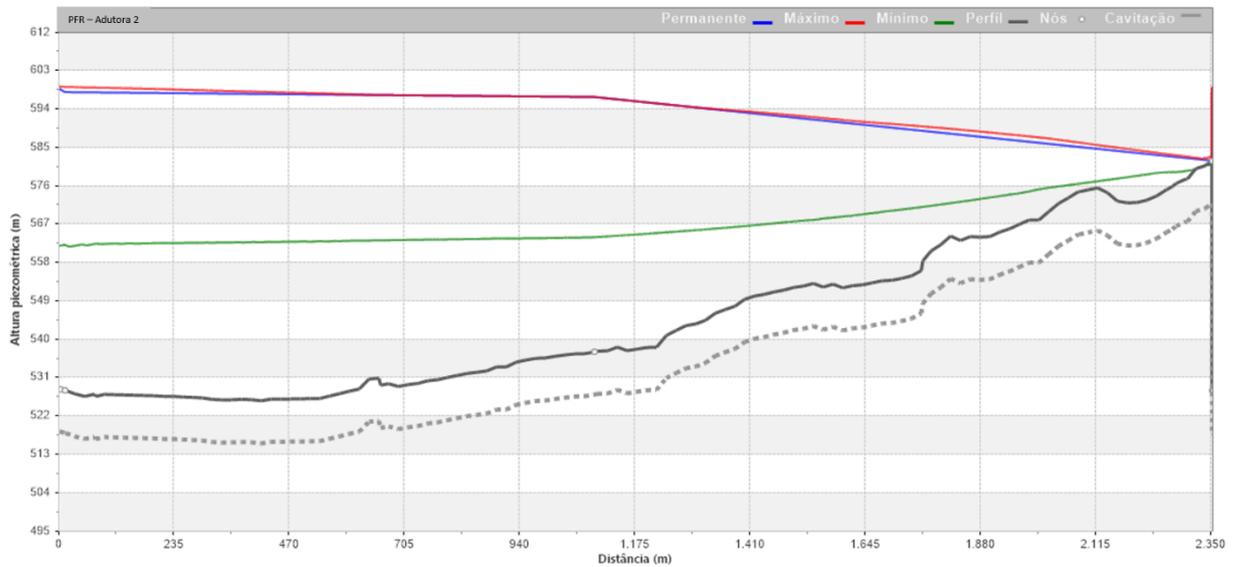
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 27 - Envoltória das pressões máximas e mínimas da Adutora 1 com o THO (com proteção), cenário 3



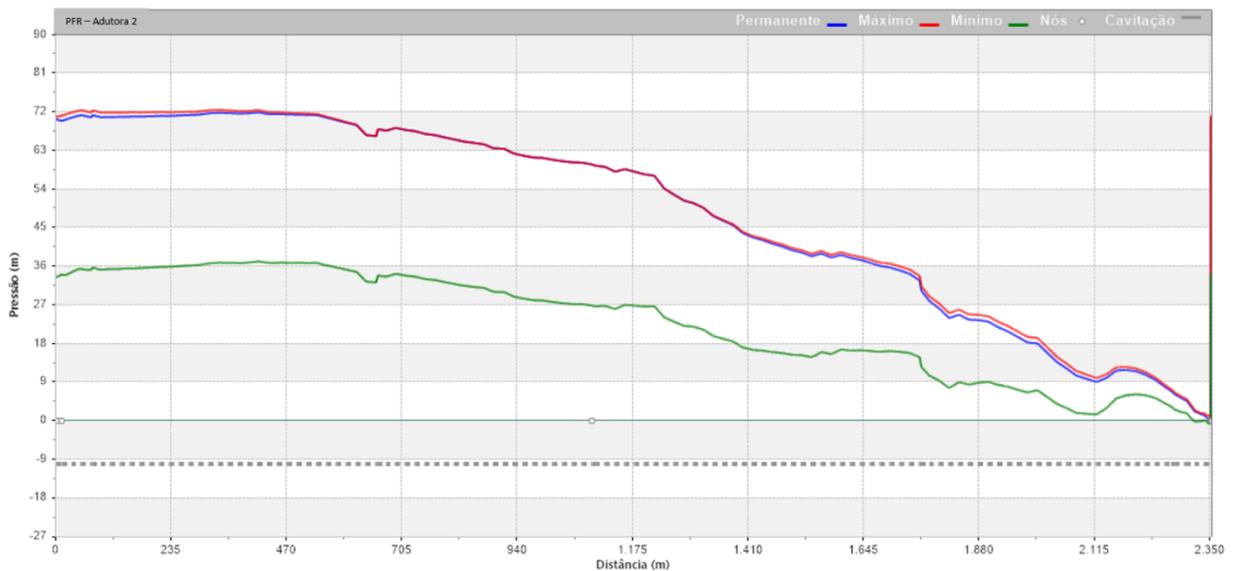
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 28 - Envoltória das alturas piezométricas máximas e mínimas da Adutora 2 com o THO (com proteção), cenário 3



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 29 - Envoltória das pressões máximas e mínimas da Adutora 2 com o THO (com proteção), cenário 3



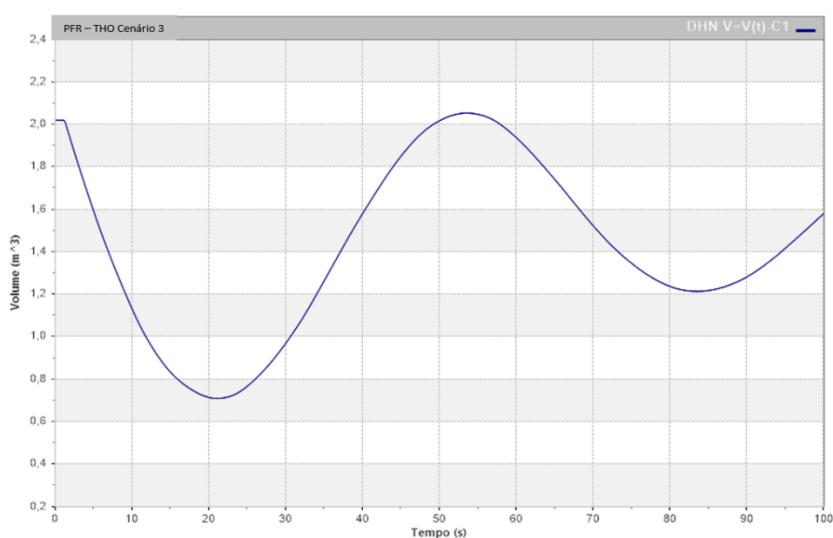
Fonte: Autoria própria (2021)

Observa-se que as linhas piezométricas de ambas as adutoras passam a ter um comportamento muito mais constante e as pressões máximas do transitório ficam muito próximas ao comportamento do regime permanente na adutora 1 e quase iguais na adutora 2, o que denota um ótimo controle imposto pelos tanques hidropneumáticos. As pressões mínimas por sua vez, em ambas as adutoras se

descolam completamente da linha de cavitação, ficando muito acima e sem oferecer riscos de criação de vapor e possibilidade de separação de colunas.

A faixa de variação de pressão também diminui para cerca de 37mca, uma redução de cerca de 74% para ambas as adutoras, o que corrobora com a constatação de maior controle do sistema. É importante apontar que o tanque passa a absorver essas alterações a partir da dinâmica de expansão e compressão da câmara flexível de ar. Essa variação é percebida com clareza quando se observa a variação do volume de água dentro dos tanques, apresentado na Figura 30.

Figura 30 - Variação de volume de água dentro de cada THO ao longo do transiente no cenário 3

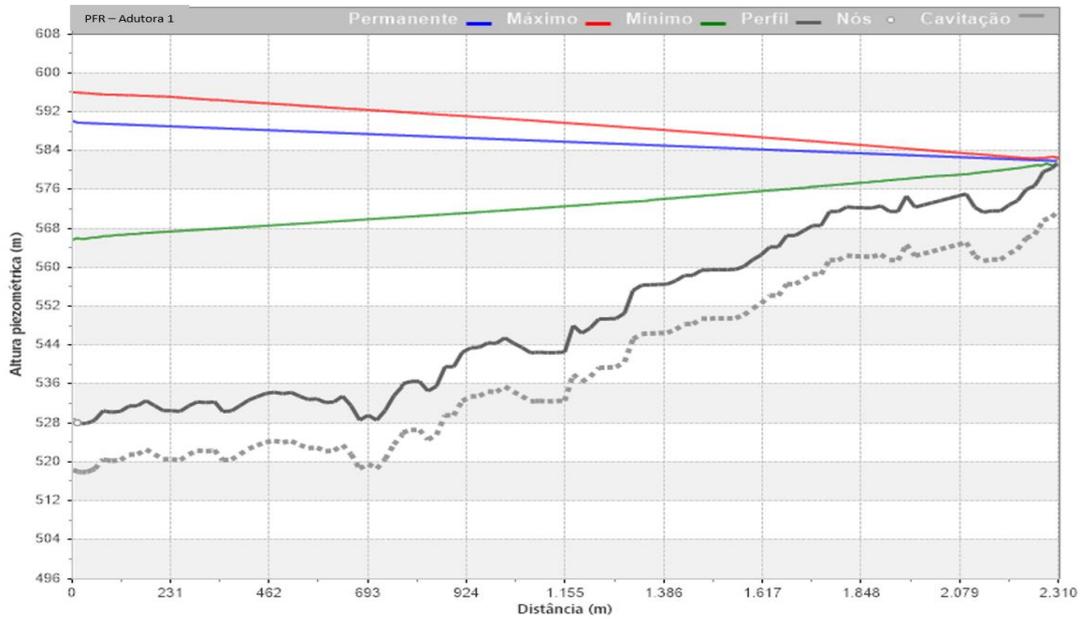


Fonte: Autoria própria (2021)

O resultado é hidráulicamente excelente e controla o transiente fazendo com que seus efeitos estejam dentro da capacidade de serviço das tubulações. Como consequência, as falhas de curta e longa duração são eliminadas para o cenário 1, que era aquele com maior variação de pressão.

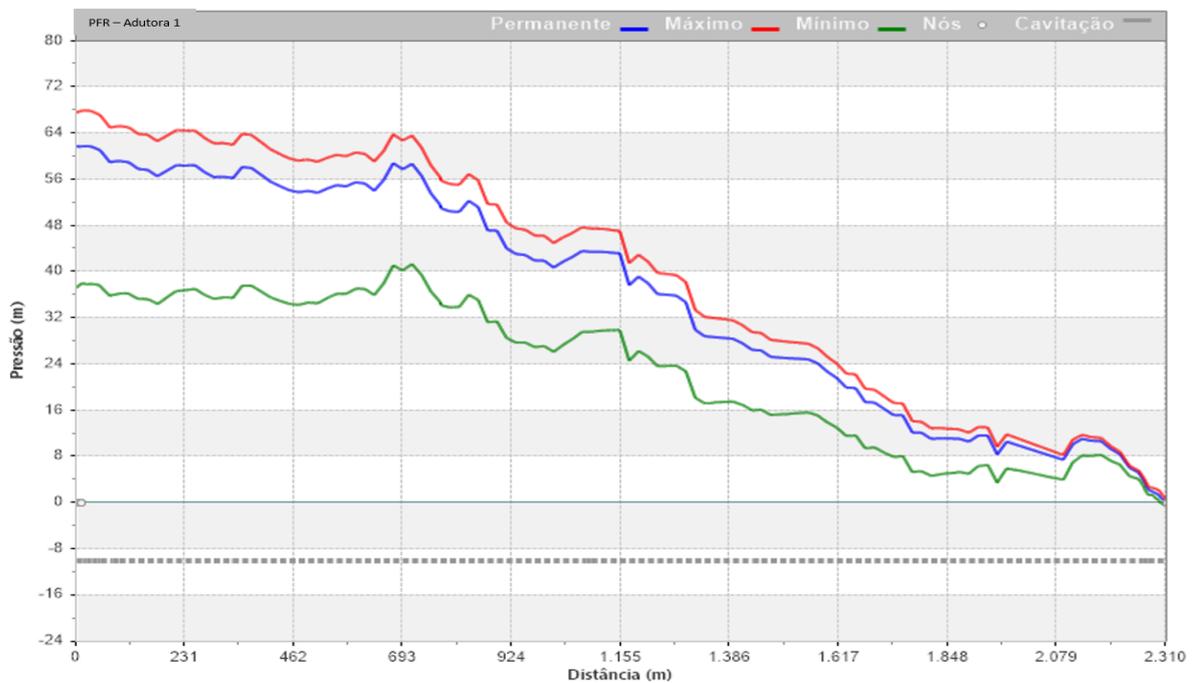
## CENÁRIO 04 – UMA BOMBA EM OPERAÇÃO COM THO

Figura 31 - Envoltória das alturas piezométricas máximas e mínimas da Adutora 1 com o THO (com proteção), cenário 4



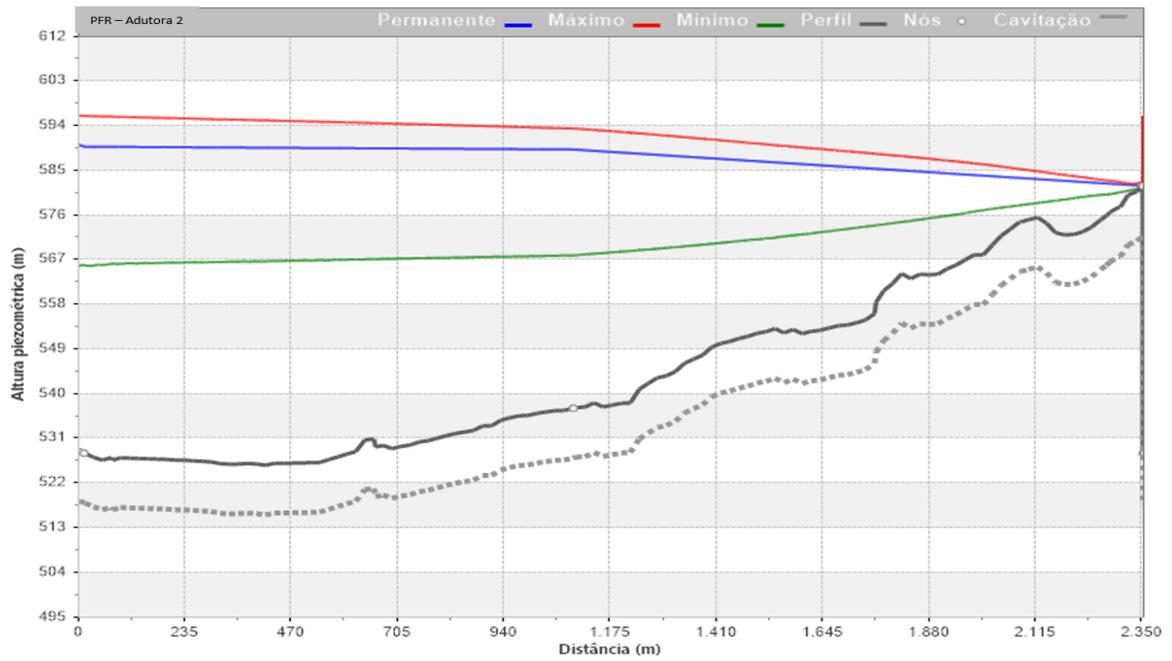
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 32 - Envoltória das pressões máximas e mínimas da Adutora 1 com o THO (com proteção), cenário 4



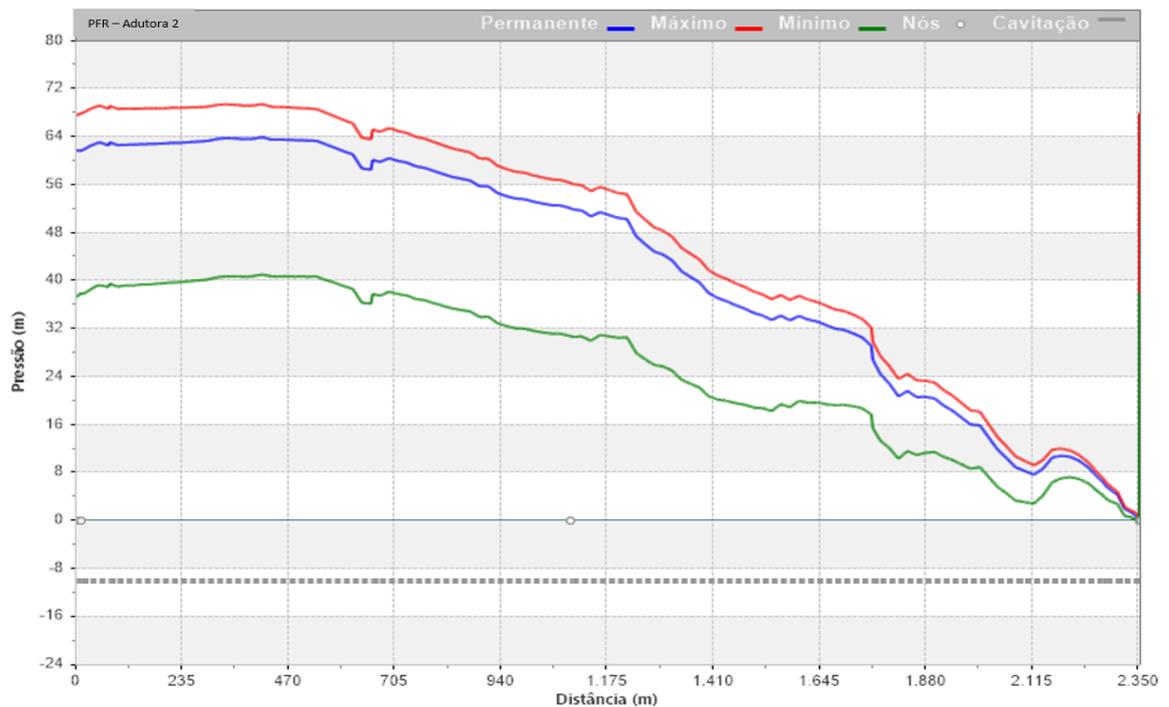
Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 33 - Envoltória das alturas piezométricas máximas e mínimas da Adutora 2 com o THO (com proteção), cenário 4



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 34 - Envoltória das pressões máximas e mínimas da Adutora 2 com o THO (com proteção), cenário 4



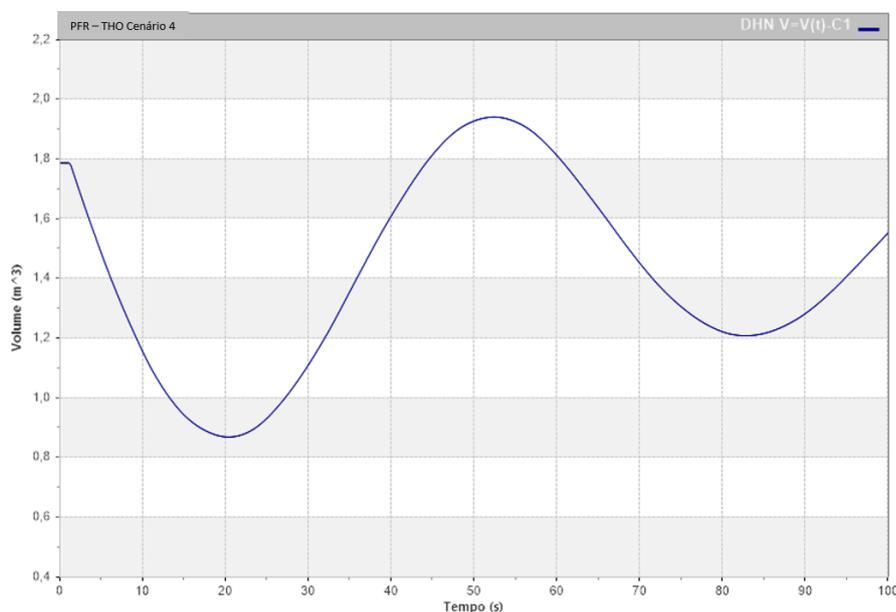
Fonte: Autoria própria (2021)

Assim como no Cenário 3, o cenário 4 também apresenta como resultados de envoltórias as linhas piezométricas com comportamento muito mais constante. As pressões máximas também ficam mais próximas das pressões do regime permanente apesar de não tanto quanto no caso do cenário 3.

As pressões mínimas, por sua vez, também se deslocam completamente da linha de cavitação, estando, em termos de linhas piezométricas, acima da linha do terreno, denotando um controle das ondas provocado pelos tanques hidropneumáticos.

A faixa de variação de pressão diminui para 28mca, uma redução de aproximadamente 74 % para ambas as adutoras, o que corrobora com a constatação de maior controle do sistema. Apresenta-se também para o cenário 4 a variação de volume de água do THO, evidenciando a absorção de efeitos e regularizando as pressões. Essa variação, muito semelhante ao observado no cenário 33, é apresentada abaixo:

Figura 35 - Variação de volume de água dentro de cada THO ao longo do transiente no cenário 4



Fonte: Autoria própria (2021)

Assim como no cenário 3, os resultados para o cenário 4 são excelentes em termos hidráulicos, com um controle muito melhor do sistema adutor como um todo, validando, assim, a proposta de solução.

**CONCLUSÃO: os transitórios são aceitáveis.**

#### **4.4.4 Instalação dos tanques hidropneumáticos**

A instalação dos tanques hidropneumáticos ocorrerá antes da caixa de manobra de forma que os dispositivos atentam a o sistema como um todo e proteja os conjuntos motobombas da EEAB.

As definições técnicas foram obtidas em catálogo técnico de um fabricante de tanques renomado no mercado, a Hydrostec. Tal catálogo encontra-se no ANEXO C – Catálogo Tanques hidropneumáticos – deste documento.

Como finalização, são apresentadas peças gráficas que demonstram o local de implantação dos THOs e suas especificações técnicas propostas, a nível de anteprojeto. Esse produto encontra-se no APÊNDICE F – Anteprojeto proposto para proteção contra golpe de aríete deste documento.

## 5 CONCLUSÕES

O trabalho aqui executado teve como principal objetivo estudar o comportamento de um sistema adutor de água bruta por recalque do SAA Porto Ferreira já em operação quando submetido ao regime de escoamento transiente causado pela parada de conjuntos moto-bomba.

Para tanto foi executada a caracterização do sistema adutor na sua operação regular, a simulação computacional do regime permanente e transiente para o diagnóstico, a proposição de equipamentos atenuadores e novamente a modelagem hidráulica agora com os equipamentos propostos de instalados de forma a evidenciar o controle do transitório.

Através das envoltórias de pressão e alturas piezométricas resultantes da simulação, o diagnóstico revelou o comportamento desequilibrado das tubulações, com pressões máximas pouco acima da capacidade dos tubos, mas com pressões negativas tangenciando a linha limite para o fenômeno de cavitação, o que mostra uma alta vulnerabilidade do sistema aos efeitos do transiente hidráulico.

Com efeito, é proposto o controle do transiente de forma sistêmica através da instalação de dois tanques hidropneumáticos com capacidade de 4m<sup>3</sup> cada. Os equipamentos permitiram o amortecimento das pressões máximas e o estabelecimento de pressões mínimas positivas durante o transiente.

A solução é justificada através dos resultados da simulação hidráulica executada com a topologia do prognóstico onde as pressões são absorvidas pelo tanque e controladas na tubulação, revelando um comportamento gráfico inclusive próximo aos típicos da literatura na descrição de sistemas em regime permanente.

Enquanto as pressões máximas passam a se comportar praticamente iguais às pressões em regime permanente, as pressões mínimas se afastam completamente da linha limite para cavitação. A variação de pressões também é reduzida em 74% em relação ao cenário sem os tanques, trazendo estabilidade para as tubulações. Dessa forma, é evidenciado que o transiente é controlado com a instalação dos equipamentos.

Os resultados obtidos são condizentes com o apontado pela literatura e a utilização de um software renomado e validado pelo mercado e pela academia ratifica seus produtos. Importante citar que além dos tanques hidropneumáticos recomenda-se a programação dos inversores de frequência desligamento em rampa de maneira

a gerar uma diminuição lenta e gradual da vazão recalçada e a instalação de geradores de energia elétrica para evitar a parada das bombas dentro do plano de melhoria. Essas ações evitam reduzem o impacto em caso de paradas não ligadas a quedas de energia.

Como toda investigação, há espaço para melhorias e aprofundamento. Para o futuro recomenda-se executar medições de pressão do fenômeno transiente em pontos críticos da adutora. Outro aperfeiçoamento de resultados possível é a determinação da rugosidade através de medições de vazão e exame de amostras das tubulações. Esse tipo de estudo tem serventia não só para análise de transiente como também para outros tipos de modelagens hidráulicas, além de ser uma avaliação importante para averiguar as condições de operação das tubulações.

Salienta-se que o estudo do transiente hidráulico das adutoras em operação é uma ferramenta de planejamento operacional e de engenharia ao executar o processo de caracterizar um objeto de estudo, diagnosticá-lo a fim de conhecê-lo e propor soluções baseadas na melhor técnica possível de forma condizente com a realidade do SAA. Esse tipo de estudo é crucial para a manutenção da vida útil dos sistemas e controle dos riscos de engenharia de um local. É um trabalho, portanto, de melhoria operacional através da engenharia.

## 6 REFERÊNCIAS

- BOULOS, P. F. et al. Hydraulic Transient Guidelines for Protecting Water Distribution Systems. **Journal AWWA**, p. 19, 2005.
- BRASIL. **LEI No - 11.445, de 5 de Janeiro de 2007**. Brasil, 2007. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm)>. Acesso em: 26 ago. 2021
- BRK. **Dados Operacionais SAA PFR**. Porto Ferreira. BRK Ambiental Porto Ferreira, , 2021.
- BULHÕES, J. L. **Escoamento Transitório e perdas de água: análise em sistemas de distribuição da cidade de Salvador-BA**. [s.l.] Universidade Federal da Bahia, 2017.
- DAVIS, A. Hydraulic transients in transmission and distribution systems. **Urban Water Journal**, v. 2, p. 157–166, 2010.
- FRIEDMAN. **Verification and Control of Low-pressure Transients in Distribution Systems** Boston 18th Annual ASDWA Conf.. Boston, 2003.
- GARCEZ, L. N. **Elementos de engenharia hidráulica e sanitária**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 1981.
- GUSMÃO, I. C. D. DE. **Uma descrição dos principais mecanismos de alívio do golpe de aríete em adutoras**. [s.l.] Universidade Federal Rural do Semi-árido, 2019.
- HARTMANN, N. I. D. **Projeto de um diâmetro econômico para um sistema de adução de água bruta por recalque**. [s.l.] Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2019.
- HYDROSTEC. **Reservatórios antigolpe de aríete com bexiga Hydramer**. Taubaté: Hydrostec, 2021.
- ITA-UPV. **Manual Técnico Allievi**. 1. ed. Valência: [s.n.], 2021.
- ITA-UPV. **10 razones para usar Allievi**. Disponível em: <<https://www.allievi.net/razones-es.php>>. Acesso em: 26 ago. 2021.
- JUNG, B. S. et al. Systematic Surge Protection for Worst-Case Transient Loadings in Water Distribution Systems. **Journal of Hydraulic Engineering**. pg 218-223. v. 135, 2009.
- MATTIELLO, J. Z. **Análise de ocorrência de transientes hidráulicos em um sistema de adução de água no modelo Mike Urban**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.
- MENDES, L. F. M. **Métodos Clássicos de Protecção de Sistemas Elevatórios Contra o Golpe de Ariete**. [s.l.] Universidade Nova de Lisboa, 2011.
- MESSIAS, A. Modelagem computacional dos transitórios hidráulicos do subsistema adutor lago Norte/Paranoá do Distrito Federal. n. 1, p. 1–13, 2017.
- NASA. **MDE Alos Palsar**. Disponível em: <<https://search.asf.alaska.edu/#/>>. Acesso em: 1 set. 2021.
- NETTO, M. F. Y F. R. DE A. A. E. I. A. **Manual de Hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 1998.
- OLIVEIRA, R. P.; JUNIOR, E. L. Pré-dimensionamento e modelação de tanques hidropneumáticos. **Revista de Trabalhos de Iniciação Científica da UNICAMP**, v. 27, 2019.
- ONU. **Resolução 64/292**. (ONU, Ed.)The Human Right to water and sanitation.

**Anais...**Zaragoza: ONU, 2010

PEJOVIC, S.; BOLDY, A.P.; & OBRADOVIC, D. **Guidelines for Hydraulic Transient Analysis**. England-USA: Gower Technical Press, 1987.

PERIARD, G. **Matriz GUT – Guia completo Como montar a Matriz GUT**. Disponível em: <<http://www.sobreadministracao.com/matriz-gut-guia-completo/>>. Acesso em: 12 set. 2021.

PORTO, R. DE M. **Hidráulica Básica**. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006.

REMENIERAS, G. Dispositif simple pour réduire la célérité des ondes élastiques dans les conduites en charge. **La Houille Blanche**, v. Special A, p. 172–196, 1952.

SAINT-GOBAIN. **Catálogo Técnico SAINT-GOBAIN Canalização**. Rio de Janeiro: Saint Gobain, 2015.

SANTANA, K. G. S. Modelagem computacional do golpe de aríete em todos de PVC DEFoFo, aço galvanizado e ferro fundido (diferentes espessuras): análise do comportamento de transientes hidráulicos nos tubos quando à interrupção abrupta no sistema elétrico. **21° Semana de Pesquisa da Universidade Tiradentes**, 2019.

SERDAN, D.; SILVA, M. **O emprego de válvulas ventosas nas redes de abastecimento de água**CampinasXX Congresso Interno de Iniciação Científica da UNICAMP, , 2012.

SIGRH-SP. **Identificação dos Municípios Por UGRHI/CBH**. Disponível em: <<https://sigrh.sp.gov.br/municipios>>.

SILVA, P. A. **Amortecimento da celeridade de onda em condutos forçados**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2006.

STEPHENSON, D. Simple Guide for Design of Air Vessels for Water Hammer Protection of Pumping Lines. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 130, n. 3, p. 273–275, 2004.

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

TIGRE. **Infraestrutura Água - Catálogo T**. Joinville: Tigre, 2021.

TSUTIYA, M. T. **ABASTECIMENTO DE ÁGUA**. [s.l: s.n.].

## **APÊNDICE A – Localização Do Objeto De Estudo**



**APÊNDICE B – Projeto *As Built* Da Captação Vila Sybilla**





**APÊNDICE C – Perfil Das Linhas De Adução De Água Bruta 01 E 02**





**APÊNDICE D – Planilha de Cotas das adutoras**







## **APÊNDICE E – Rotina de Operação do Sistema Adutor de Água Bruta de Porto Ferreira**

**Objetivo:** Este documento tem por objetivo coletar e consolidar informações sobre a rotina de operação do Sistema Adutor Vila Sybilla, objeto de estudo do Trabalho de Conclusão de Curso da Discente Gabriella Oliveira Baracho a ser apresentado à Universidade Federal de São Carlos.

**Equipes Entrevistadas:** Operação de Água e Esgoto; Manutenção de Redes.

**Data de entrevista:** 06 de setembro de 2021

**Conteúdo dos questionamentos:** foram executados questionamentos gerais sobre as regras de operação das bombas, manobras executadas regularmente e em caso de eventos sinistros, embora recorrentes, além das condições gerais de operação. A partir disto, foi elaborado um compilado das respostas e das observações da autora em vistorias de campo.

### **COMPILADO DA ROTINA DE OPERAÇÃO: Sistema Adutor Vila Sybilla**

#### *Quanto a operação das bombas da EEAB Vila Sybilla:*

Atualmente as bombas em funcionamento são as identificadas como BOM.CEN.0002 e BOM.CEN.0003. A BOM.CEN.0001 não está conectada ao barrilete da Casa de Bombas e é de características operacionais inferiores aos das demais bombas – menor vazão e altura manométrica -, dessa forma, tal bomba não seria capaz de entregar a vazão necessária a ETA (cerca de 200l/s) se funcionasse em detrimento de outra.

A EEAB opera 24 horas por dia, sendo o funcionamento da BOM.CEN.0002 constante. O acionamento da BOM.CEN.0003 ocorre nos horários de maior consumo, determinado entre os horários das 05h00 às 19h.

#### *Quanto à operação dos dispositivos na caixa de manobras da EEAB Vila Sybilla:*

A caixa de manobra contém registros e válvulas que apenas são operadas em caso de ordens da coordenação ou gerência da SPE. Importante apontar que a adutora 02

possui uma válvula de alívio que é mantida aberta. Em caso de queda de energia, parada da bomba ou outro tipo de evento perigoso onde pode haver contra fluxo de água a válvula começa a operar aliviando a pressão liberando água na caixa de manobras. Nesses casos, a Central de Monitoramento envia o Operador Volante para fechar o registro anterior à válvula.

Quanto à operação das tubulações:

Não são executadas atividades de rotina nas tubulações e dispositivos instalados como manobras e desvios.

A equipe de manutenção de redes faz, mensalmente, a inspeção da ventosa instalada na Adutora 02 na travessia da Avenida, Rudolph Street, onde é gravado um vídeo da ventosa em funcionamento e é verificado se o registro está aberto.

Quanto à medições de vazão, pressão e volumétricas:

Não existem medidores de vazão separadamente para as duas adutoras.

É possível medir a pressão na saída do barrilete das bombas.

Diariamente, à meia-noite, o operador volante registra a medição do macromedidor instalado a montante da caixa de manobras e portanto, antes da bifurcação das adutoras 01 e 02.

**APÊNDICE F – Anteprojeto proposto para proteção contra golpe de aríete**



## ANEXO A – Ficha Cadastral Bombas EEAB

Nome	MOT.ELE.0016	BOM.CEN.0001	BOM.CEN.0002	BOM.CEN.0003	BOM.CEN.0004	
Localização	EEA VILA REAL	CAPTAÇÃO MOGI	CAPTAÇÃO MOGI	CAPTAÇÃO MOGI	CAPTAÇÃO MOGI	
Ponto de Referência	Bomba Reseva					
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS						
Modelo	W22 PLUS	INI 150-400	MEGANORM 200-400		MEGABLOC 4C - 125	
Fabricante	WEG	IMBIL	KSB		KSB	
φ Entrada (mm)	150	200	250	250	80	
φ Saída (mm)	100	150	200	200	50	
φ Rotor (mm)	256	400	404	404		
Potência (cv)	15	175	300	300	7,5	
Nº de estágios	1	1	1	1	1	
Vazão (m³/h)	80		450	450		
Inversor de Frequência	Software	Não	Sim		Software	
Curva Característica						
Existe?						
Macromedidor de saída	SIM/NÃO	-	Não	Sim	Sim	Não
Se sim, qual tipo?		-	-	Eletromagnético	Eletromagnético	-
Em uso?	SIM/NÃO	-	Não	Sim	Sim	Não
CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS						
Cota do terreno		-	539	539	539	539
Cota da Sucção		-				
Cota do Recalque		-				4m
Origem		-	Poço sucção	Poço sucção	Poço sucção	Poço sucção
Destino	Em uso?	-	ETA	ETA	ETA	ETA
<b>OBSERVAÇÃO</b>	Reserva não está instalada	Não está funcionando. Conjugado com MOT.ELE.0001	Pressão de saída da rede 67 mca as 08:25 - Conjugada com MOT.ELE.0002	Pressão de saída da rede 69 mca as 08:30 - Conjugada com MOT.ELE.0003	Conjugado com MOT.ELE.0004. Bomba de escorva	
LEGENDA						
<input checked="" type="checkbox"/> Dados Campo <input type="checkbox"/> Dados Escritório						

Nome	MOT.ELE.0001	MOT.ELE.0002	MOT.ELE.0003	MOT.ELE.0004	MOT.ELE.0005	
Localização	CAPTAÇÃO MOGI	CAPTAÇÃO MOGI	CAPTAÇÃO MOGI	CAPTAÇÃO MOGI	EEA ETA	
Ponto de Referência					Bomba equipe	
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS						
Modelo	STANDART	W22 Premium	W22 Premium	W22 PLUS	STD	
Fabricante	WEG	WEG	WEG	WEG	WEG	
φ Entrada (mm)	200	250	250	80	150	
φ Saída (mm)	150	200	200	50	100	
φ Rotor (mm)	400	404	404		-	
Potência (cv)	175	300	300	7,5	40	
Nº de estágios	1	1	1	1	1	
Vazão (m³/h)		450	450		-	
Inversor de Frequência	Não	Sim	Sim	Software	Sim	
Curva Característica						
Existe ?						
Macromedidor de saída	SIM/NÃO	Não	Sim	Sim	Não	Sim
Se sim, qual tipo?		-	Eletromagnético	Eletromagnético	-	Eletromagnético
Em uso?	SIM/NÃO	Não	Sim	Sim	Não	Sim
CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS						
Cota do terreno			539			
Cota da Sucção						
Cota do Recalque				4m		
Origem	Poço de sucção	Poço de sucção	Poço de sucção	Poço de sucção	ETA	
Destino	ETA	ETA	ETA	ETA	Booster Cristo	
OBSERVAÇÃO	Está desativado Conjugada com BOM.CEM.0001	Pressão de saída da rede 67 mca as 08:25 - Conjugada com BOM.CEM.002	Pressão de saída da rede 69 mca as 08:30 - Conjugada com BOM.CEM.003	Conjugada com BOM.CEM.0004 Bomba de escorva	Direciona a água para a rede do Setor 4.	
LEGENDA						
		<input checked="" type="checkbox"/> Dados			<input type="checkbox"/> Dados Escritório	

## ANEXO B – Dados Operacionais da Válvulas de Alívio

**FABRICANTE:** Bermad

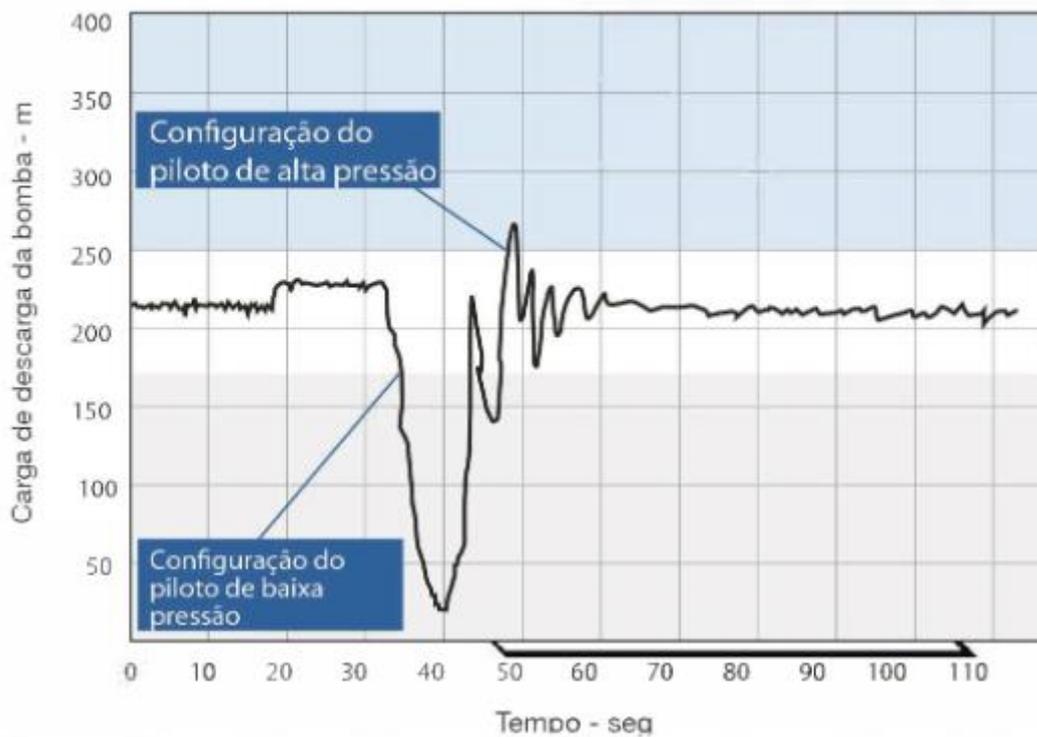
**MODELO:** VA-612

**SETPOINT BAIXA PRESSÃO:** 20MCA

**ACIONAMENTO:** Em resposta à queda de pressão

**METODOLOGIA DE AJUSTE:** Fecho mecânico.

**Pressão em Estação de Bombeamento Protegida pelo Modelo VA-612**



## ANEXO C – Catálogo Tanques hidropneumáticos



B100.25.2-P

### RESERVATÓRIOS ANTIGOLPE DE ARÍETE COM BEXIGA HYDRAMER®

Controle dos golpes de  
aríete

Para o controle de transientes hidráulicos em estações de bombeamento e circuitos hidráulicos diversos, existem várias soluções disponíveis, entre elas, os reservatórios hidropneumáticos. Para essa solução a **hydrostec** aprimorou o conceito e estudou sua alternativa para reservatórios hidropneumáticos, desenvolvendo o **HYDRAMER®**.

O **HYDRAMER®** diferencia-se dos reservatórios hidropneumáticos convencionais pelo emprego de uma bexiga de poliuretano montada internamente ao reservatório, que tem a função de isolar o líquido do ar comprimido.

Com a isolação dos fluidos de trabalho não é mais necessária a utilização de compressores auxiliares para a reposição permanente do ar comprimido que se emulsionava na água, e a consequente recuperação da pressão de serviço. Como resultado desse conceito, temos uma minimização dos custos de manutenção e maior segurança e confiabilidade na proteção do circuito.

#### Baixo custo

A isolação dos dois fluidos permite trabalhar com altas pressões. Além disso, a não necessidade de alimentação constante por ar comprimido elimina um custo elevado de aquisição e manutenção de compressor e auxiliares.

#### Segurança

A concepção com bexiga elimina qualquer contato do líquido com as partes metálicas. O risco de corrosão neste caso é muito reduzido nas partes metálicas do reservatório e pode ser eliminado quando se usa algum gás inerte. Nesse caso, recomendamos o uso de nitrogênio, apenas por questão de segurança industrial, embora o uso de outro gás não seja restringido.

O poliuretano usado é o mesmo aplicado na indústria alimentícia. Desta forma, não existe risco de contaminação, de aparecimento de sabor ou odor indesejáveis, podendo assim ser empregado com água potável.

O código ASME, divisão I –



Seção III, para vasos de pressão é usado para o dimensionamento, fabricação e inspeção de todos os **HYDRAMER®**. Para garantia da qualidade total dos fornecimentos, todos os **HYDRAMER®** são submetidos a teste hidrostático de pressão conforme a norma citada ou 1,3 vezes a pressão nominal.



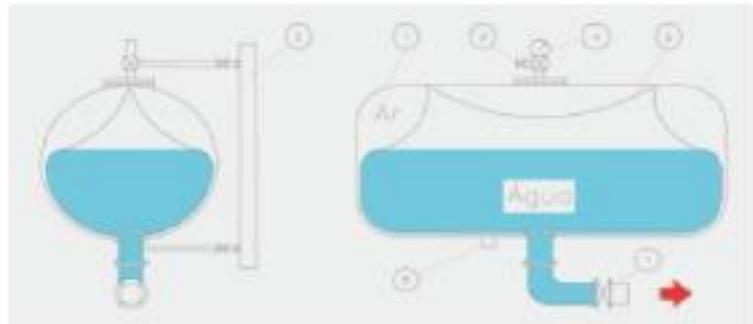
### Observações

- No funcionamento do HYDRAMER® é necessária a inclusão de um válvula de isolamento na sua saída;
- Reservatórios com volume superior a 50m<sup>3</sup>, apenas sob consulta, entretanto, já fornecemos reservatórios com 105m<sup>3</sup> de volume;



### Componentes do Reservatório HYDRAMER®

1. Reservatório
2. Bexiga de poliuretano
3. Válvula de enchimento de ar
4. Manômetro
5. Indicador de nível
6. Purga de ar
7. Ligação com a rede (fornecimento opcional)



### Princípio de funcionamento do HYDRAMER®



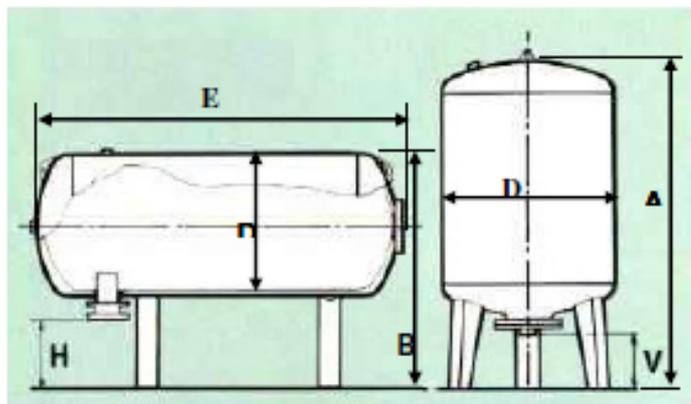
1. Em funcionamento normal, o reservatório está 2/3 cheio de fluido.

2. O volume útil se destina a compensar a depressão produzida na tubulação no momento de desligamento das bombas.

3. O nível do fluido vai variando até o final da flutuação de pressão.

**hydrostec**

## Dimensões



Volume (m³)	D (mm)	E (mm)	A (mm)	B (mm)	V (mm)	H (mm)
1,0	950	1760	2680	1815	670	350
1,5	1050	2140	2920	1915	670	350
2,0	1200	2210	3180	2090	700	370
2,5	1250	2515	3380	2140	700	370
3,0	1350	2600	3540	2270	720	400
4,0	1500	2815	3830	2440	730	410
5,0	1600	3080	4030	2540	730	410
10,0	2000	3910	4810	2940	730	410
15,0	2300	4440	5430	3290	780	460
20,0	2550	4840	5990	3640	860	540
25,0	2750	5200	6390	3840	860	540
30,0	2900	5610	6700	3990	860	540
35,0	3050	5910	7000	4140	860	540
40,0	3200	6140	7320	4340	900	580
45,0	3250	6640	7430	4400	900	580
50,0	3400	6750	7650	3980	900	580

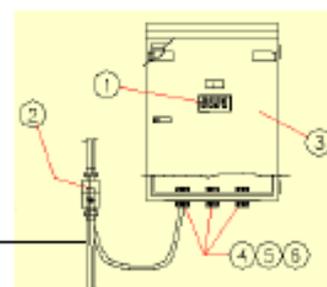
As informações da tabela acima estão sujeitas a alteração sem aviso prévio.

## Acessórios

Os indicadores e controladores utilizados possuem entrada para termopares, células de carga e sinais analógicos padronizados (4 a 20 mA ou 0 a 10 Vcc) configuráveis para visualizar: pressão, temperatura e vazão. Outras variáveis, sob consulta.

Os valores das grandezas medidas são apresentados em display de 4 ou 5 dígitos.

1. Indicador e controlador;
2. Transmissor de pressão diferencial;
3. Caixa de proteção do indicador;
4. Prensa - cabo;
5. Aruela de fixação;
6. Bucha isolada.



**hydrostec**