



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

LUCAS FLORÊNCIO DA CUNHA TEIXEIRA

PROPOSIÇÃO DE UM NOVO DISPOSITIVO PARA ALÍVIO DE GOLPE DE
ARÍETE: TUBO DE ADMISSÃO E EXPULSÃO BIDIRECIONAL (TAEB)

FORTALEZA

2026

LUCAS FLORÊNCIO DA CUNHA TEIXEIRA

PROPOSIÇÃO DE UM NOVO DISPOSITIVO PARA ALÍVIO DE GOLPE DE ARÍETE:
TUBO DE ADMISSÃO E EXPULSÃO BIDIRECIONAL (TAEB)

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Marco Aurélio Holanda de Castro, Ph.D.

LUCAS FLORÊNCIO DA CUNHA TEIXEIRA

PROPOSIÇÃO DE UM NOVO DISPOSITIVO PARA ALÍVIO DE GOLPE DE ARÍETE:
TUBO DE ADMISSÃO E EXPULSÃO BIDIRECIONAL (TAEB)

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Aprovada em: 10/07/2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Marco Aurélio Holanda de Castro, Ph.D. (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. D. Sc. Cláudia Telles Benatti
Universidade Estadual de Maringá (UEM)

Prof. D. Sc. Celso Bandeira de Melo Ribeiro
Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)

Prof. D. Sc. Lindemberg Lima Fernandes
Universidade Federal do Pará (UFPA)

Prof. D. Sc. Cleiton da Silva Silveira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. João Marcelo Costa Barbosa (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

*Aos meus pais, Gláucia e Lauro, e a toda minha
família.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as coisas, em primeiro lugar, e pela minha saúde mental e física, pois, sem isso, nada mais seria possível. Agradeço pela conquista do título de Mestre e posterior ingresso no Doutorado, algo que torna meu sonho da docência cada vez mais próximo.

Agradeço a meus pais, Gláucia Florêncio da Cunha e Raimundo Lauro Teixeira Filho, por todo o suporte emocional e profissional dados durante a minha carreira, principalmente nos momentos mais difíceis. À minha mãe, sou grato pela insistência dela em que eu continuasse tentando ingressar no Mestrado e no Doutorado, por mais que anteriormente parecessem realidades bem distantes. A meu pai, sou grato pelos anos de contribuição para a minha carreira como Engenheiro Civil, profissão que nós dois compartilhamos.

Agradeço ao meu padraсто Osmar Oliveira da Silva, que sempre acreditou no meu potencial e me fala que eu sou um modelo de filho que ele sempre quis ter. Jamais esquecerei das vezes em que ele foi rígido comigo quando eu mais precisei e por ter melhorado depois disso.

Agradeço à minha avó Elita Florêncio da Cunha, meu grande modelo de pessoa que levarei para o resto da vida. Nunca esquecerei de todas as vezes em que ela me recebe em sua casa como se eu ainda fosse um menino.

Agradeço ao meu avô Deusdete Alves da Cunha, que Deus o tenha no reino dos céus, exemplo de disciplina e que me acolheu como pai durante a infância. Sempre terei saudades.

Agradeço à minha noiva e futura esposa Caroline Nágila do Nascimento Terto, por todo o carinho e amor demonstrado desde o início, e por sempre acreditar em mim e no meu sucesso. Espero que o que temos e a nossa parceria perdurem ao longo de todas as nossas vidas.

Agradeço aos meus sogros Francisco Carlos Terto e Rogéria Nadja do Nascimento Terto, por terem me acolhido em sua família, sempre estarem presentes em todos os momentos e me considerarem um filho que ganharam desde que nos conhecemos.

Agradeço aos meus amigos do colégio Thiago Azevedo de Vasconcelos, Raul Bruno Machado da Silva, Tales Freitas Dantas, Yuri Barbosa de Matos e Kevin Klein Feijão Sousa, pela amizade preservada ao longo dos anos, algo que pretendo prolongar por toda a vida.

Agradeço aos amigos de faculdade Breno de Souza Costa e Mateus Pires de Castro Gradvohl, pela parceria durante os anos de Unifor e de profissão que compartilhamos.

Agradeço ao meu Professor-Orientador da Graduação Anísio de Sousa Meneses Filho, modelo de docente para mim, e que me incentivou a ingressar na carreira acadêmica e a produzir artigos científicos.

Agradeço ao Engenheiro Agrônomo Márcio Luiz de Carvalho, por ter se disponibilizado a construir e realizar experimentos com o primeiro TAEB, sendo os resultados obtidos pelas simulações em campo fundamentais para o desenvolvimento e conclusão desta pesquisa.

Agradeço ao Professor Marco Aurélio Holanda de Castro, por ter me acolhido como orientando desde a época do Mestrado. Sua experiência em projetos sempre proporcionou disciplinas práticas e pesquisas bastante relevantes para a vivência da Engenharia Civil.

Agradeço aos professores participantes da banca examinadora, Profa. Cláudia Telles Benatti, Prof. Celso Bandeira de Melo Ribeiro, Prof. Lindemberg Lima Fernandes e Prof. Cleiton da Silva Silveira, por terem aceitado o convite e contribuído com melhorias para este trabalho.

Agradeço aos meus colegas do Laboratório de Hidráulica Computacional pela parceria diária e pela contribuição de cada um frente aos desafios enfrentados.

Agradeço ao meu coorientador João Marcelo Costa Barbosa, referência na área de Computação e Recursos Hídricos. Sou grato pelas reuniões e pelo apoio prestado durante os desafios enfrentados por nosso laboratório e para a conclusão desta pesquisa.

Agradeço a toda a equipe da Comol Consultoria, em especial Eptácio Lima Filho e Eptácio Lima Neto, empresa onde trabalho atualmente, que acreditou no meu potencial e possibilitou a minha inserção no mercado de trabalho de tal forma a utilizar os conhecimentos obtidos ao longo de vários anos de estudo.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, pela excelência em seu quadro docente e relevância perante as temáticas envolvendo a Engenharia Civil.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

*“Por vezes sentimos que aquilo que
fazemos não é senão uma gota de água
no mar. Mas o mar seria menor se lhe
faltasse uma gota.”*

Madre Teresa de Calcutá

RESUMO

Este trabalho se destina a avaliar o desempenho, em termos de proteção contra o golpe de aríete, do dispositivo Tubo de Admissão e Expulsão Bidirecional (TAEB), novo dispositivo proposto para a atenuação dos transientes hidráulicos. O TAEB consiste de um tubo prolongado com uma Ventosa no final da sua estrutura e o seu princípio de funcionamento baseia-se na hipótese de que a adição do tubo prolongado, preenchido por água, pode reduzir a entrada de ar de forma descontrolada promovido pela Ventosa, além de prevenir a ocorrência de pressões negativas na seção onde o TAEB está instalado. A modelagem do TAEB utilizou a compatibilização de outros dois dispositivos de alívio: a Chaminé de Equilíbrio e a Ventosa. Além disso, o cálculo do transiente considerando o dispositivo também fez uso do modelo do Método das Características (MOC) que considera a presença de ar no sistema, ou seja, o modelo de cavitação. Entende-se que a coluna líquida presente no tubo do TAEB varia no decorrer da ocorrência do transiente hidráulico, em função da admissão e expulsão de ar promovidos pela Ventosa. Dentre as vantagens da utilização do TAEB, estão a eficácia na proteção contra as subpressões, de modo a evitar os problemas de cavitação, além do custo bastante reduzido se comparado a Chaminés de Equilíbrio e Tanques de Alimentação Unidirecional, que apresentam funções bastante semelhantes. De modo a embasar este trabalho, foi realizada uma revisão bibliográfica acerca do transitório hidráulico, da solução adotada pelo MOC (principal modelo numérico adotado para solução de transientes hidráulicos em fluxo unidimensional), dos principais dispositivos de proteção contra o golpe de aríete, dos problemas relacionados à cavitação e da visão geral do Sistema UFC. Em seguida, a metodologia adotada neste trabalho é ilustrada, demonstrando os modelos de Chaminé de Equilíbrio e Ventosa, assim como a compatibilização entre eles. As equações da metodologia foram implementadas no Sistema UFC – Módulo 7, que corresponde ao módulo adotado para o cálculo de transientes hidráulicos. Para a validação do modelo, fez-se uso do dado medido de rebaixamento de nível de água, realizado durante o experimento na Adutora da Fazenda Santa Maria, em Presidente Olegário, Minas Gerais, onde foi construído um TAEB e a sua eficácia de proteção contra o transiente foi testada a partir do desligamento do conjunto motobomba. Com esse dado coletado, foi realizada uma análise de sensibilidade a partir dos resultados gerados no UFC 7 variando-se alguns parâmetros para atingir o mesmo resultado de campo. A partir da validação do modelo, o TAEB foi testado em outras adutoras, considerando-se sempre posicioná-lo no ponto com menor subpressão obtido na simulação do transiente sem nenhum dispositivo de proteção. A partir dos resultados das simulações, foi possível observar que o TAEB apresentou o comportamento de

elevação da envoltória de mínimas pressões, no nó onde ele foi instalado, até o nível do terreno acrescido do rebaixamento máximo de água atingido pelo dispositivo. Além disso, visualizando os gráficos de pressão, o TAEB limitou a pressão até o valor correspondente à altura mínima de água alcançada na simulação. Para o caso da Adutora da Fazenda Santa Maria, o TAEB também impactou as sobrepressões em toda a adutora; nos demais casos, esse efeito se restringiu às proximidades do nó onde o dispositivo foi instalado, devido, primordialmente, às diferenças entre os perfis geométricos das adutoras simuladas. Também foram realizadas simulações somente com uma Ventosa no mesmo nó onde foi instalado o TAEB. Essas simulações mostraram que a Ventosa promove maior instabilidade nos picos de pressão e também atua, em alguns casos, promovendo maiores subpressões e sobrepressões. De forma a permitir uma sensibilidade comparativa entre dispositivos, também foram realizadas comparações do TAEB com a Chaminé de Equilíbrio, demonstrando que a Chaminé é um dispositivo altamente confiável no combate a sobrepressões e subpressões, porém ela precisa de grandes dimensões para cumprir essa função. Por fim, observa-se que o TAEB cumpriu efetivamente a sua função de atenuação de pressões mínimas na adutora, porém a sua eficiência deve ser testada em softwares como o UFC 7, pois somente com as simulações e correto dimensionamento, ele irá efetivamente funcionar da maneira como foi concebido.

Palavras-chave: Transitórios Hidráulicos, Método das Características, Ventosas, Dispositivos de Proteção contra o Transiente, Chaminés de Equilíbrio.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the performance of the Bidirectional Intake and Exhaust Tube (TAEB) as a water hammer protection device, a new device proposed for hydraulic transients' mitigation. The TAEB consists of an extended vertical tube equipped with an Air Valve at its upper end. Its operating principle is based on the hypothesis that the addition of this water-filled tube can regulate the uncontrolled air intake promoted by the Air Valve, while preventing negative pressures at its installation point. The modeling of the TAEB was performed by integrating two other relief devices: the Surge Tank and the Air Valve. Furthermore, the transient calculation considering the device employed the Method of Characteristics (MOC) model that accounts for the presence of air in the system, specifically the cavitation model. It is understood that the liquid column within the TAEB varies during the hydraulic transient as a function of air intake and expulsion governed by the Air Valve. The advantages of using the TAEB include its effectiveness in protecting against negative pressures, thereby avoiding cavitation and liquid column separation, in addition to its significantly lower cost compared to Surge Tanks and One-Way Surge Tanks, which perform similar functions. To support this work, a literature review was conducted on hydraulic transients, the MOC solution (the primary numerical model for one-dimensional hydraulic transient analysis), main water hammer protection devices, cavitation-related issues and an overview of the UFC System. The methodology is subsequently presented, detailing the Surge Tank and Air Valve models, as well as their integration. The methodology's equations were implemented in the UFC System – Module 7, the specific module for hydraulic transient calculations. Model validation utilized water level drawdown data measured during an experiment at the Santa Maria Farm Pipeline in Presidente Olegário, Minas Gerais. A TAEB was constructed at this site, and its protective efficiency against transients was tested following the pump set shutdown. Using the collected data, a sensitivity analysis was performed based on the results generated in UFC 7, varying specific parameters to match the experimental field results. Following validation, the TAEB was tested in other pipelines, consistently positioned at the point of lowest negative pressure identified in unprotected transient simulations. The simulation results indicated that the TAEB successfully elevated the minimum pressure envelope at the installation node to the ground level plus the maximum water drawdown reached within the device. Additionally, pressure graphs showed that the TAEB limited the pressure to the value corresponding to the minimum water height reached during simulation. For the Santa Maria Farm Pipeline case, the TAEB also impacted positive pressures across the entire system; in other cases, this effect was restricted to

the vicinity of the installation node, primarily due to differences in the geometric profiles of the simulated pipelines. Simulations were also conducted using only an Air Valve at the same node where the TAEB was installed. These simulations showed that the Air Valve promotes greater instability in pressure peaks and, in some cases, leads to higher negative and positive pressures. To provide a comparative sensitivity between devices, comparisons were also made between the TAEB and the conventional Surge Tank, demonstrating that while the Surge Tank is a highly reliable device for relieving maximum and minimum pressures, it requires massive structural dimensions to fulfill this function. Finally, it is observed that the TAEB effectively fulfilled its function of attenuating minimum pressures in the pipeline. However, its efficiency must be verified in software such as UFC 7, as its conception relies on accurate simulations and correct sizing to function effectively.

Key-words: Hydraulic Transients, Method of Characteristics, Air Valves, Water Hammer Protection Devices, Surge Tanks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Publicações relacionadas ao termo “ <i>water hammer</i> ” em escala mundial com os dados da plataforma <i>Web of Science</i> e <i>Scopus</i> (entre 1882 e 2026).....	40
Figura 2 – Mapa de cocitações dos autores para o termo “ <i>transient control</i> ” com os dados da plataforma <i>Web of Science</i> e <i>Scopus</i> (1963 – 2026).....	41
Figura 3 – Gráfico de publicações por país com o termo “ <i>transient control</i> ” com os dados da plataforma <i>Web of Science</i>	42
Figura 4 – Mapa de coocorrência de palavras-chave mais utilizadas pelos autores no termo “ <i>transient control</i> ” com os dados das plataformas <i>Web of Science</i> e <i>Scopus</i>	43
Figura 5 – Mapa de coocorrência de palavras-chave mais utilizadas pelos autores nos termos “ <i>transient control</i> ” e “ <i>surge tank</i> ” ou “ <i>air valve</i> ” com os dados da plataforma <i>Web of Science</i>	44
Figura 6 – Mapa de coocorrência de palavras-chave mais utilizadas pelos autores nos termos “ <i>transient control</i> ” e “ <i>surge tank</i> ” ou “ <i>air valve</i> ” com os dados da plataforma <i>Scopus</i>	44
Figura 7 – Anomalias encontradas em tubulações em sistemas urbanos de abastecimento de água.....	46
Figura 8 – Danos causados pelo golpe de aríete em tubulações de adutoras	47
Figura 9 – Linhas características do MOC no plano $x - t$	55
Figura 10 – Zonas e quadrantes de operação da bomba centrífuga segundo Martin (1983)....	60
Figura 11 – Aproximação considerada para a curva característica da bomba.....	62
Figura 12 – Condição de contorno da bomba centrífuga a montante	63
Figura 13 – Bomba com linha de sucção longa.....	67
Figura 14 – Junção de dois trechos.....	69
Figura 15 – Chaminé de Equilíbrio presente na Central Hidrelétrica do Rio Tigre	71
Figura 16 – Tanque de Alimentação Unidirecional presente em adutora no Mato Grosso do Sul.....	73
Figura 17 – Representação esquemática do RHO	74
Figura 18 – Representação esquemática da PRV	75
Figura 19 – Ventosa de Pequeno Orifício	76
Figura 20 – Ventosa de Grande Orifício	77
Figura 21 – Ventosa de Trílice Função	77
Figura 22 – Válvula de Retenção Horizontal	79
Figura 23 – Válvula de Retenção Vertical.....	79

Figura 24 – Válvula de Retenção tipo Portinhola	80
Figura 25 – Válvula de Retenção tipo Fundo de Poço	80
Figura 26 – Válvula de Retenção tipo Disco (com portinhola dupla e única)	81
Figura 27 – Volante de Inércia	82
Figura 28 – Diagrama estrutural do Sistema UFC	89
Figura 29 – Módulo UFC 2 integrado ao AutoCAD	90
Figura 30 – Ferramentas do UFC 3	90
Figura 31 – Interface do UFC 5.....	91
Figura 32 – Integração entre o UFC 5 e o UFC 7.....	92
Figura 33 – Interface do UFC 7.....	93
Figura 34 – Envoltórias máximas, mínimas e linha permanente.....	93
Figura 35 – Inserção de dispositivos de proteção contra o golpe de aríete no UFC 7	94
Figura 36 – Inserção de TAU em nó selecionado no UFC 7.....	94
Figura 37 – Comando de geração do arquivo do EPANET por meio do UFC 2	95
Figura 38 – Comandos do UFC 8.....	96
Figura 39 – Comandos do UFC 9.....	96
Figura 40 – Ferramentas do UFC 11	97
Figura 41 – Representação esquemática do TAEB com as variáveis de entrada para o cálculo	99
Figura 42 – Modelagem da Ventosa segundo Chaudhry (2014).....	102
Figura 43 – Modelo da Chaminé de Equilíbrio	105
Figura 44 – Fluxograma de cálculo da condição de contorno do TAEB no UFC 7.....	111
Figura 45 – Planta baixa da Adutora da Fazenda Santa Maria no UFC 7.....	115
Figura 46 – Perfil da Adutora da Fazenda Santa Maria	116
Figura 47 – Curva característica da bomba EBARA GSD 40-250 30CV.....	117
Figura 48 – Planta baixa da Adutora de Aurora/CE no UFC 7	121
Figura 49 – Perfil da Adutora de Aurora/CE.....	121
Figura 50 – Curva característica da bomba da Adutora de Aurora/CE.....	122
Figura 51 – Planta baixa da Adutora de Alcântara/MA no UFC 7	124
Figura 52 – Perfil da Adutora de Alcântara/MA	124
Figura 53 – Curva característica da bomba KSB 40-315	125
Figura 54 – Planta baixa da Adutora de Acaraú/CE no UFC 7.....	127
Figura 55 – Perfil da Adutora de Acaraú/CE	128
Figura 56 – Curva característica da bomba Flygt MT.....	129

Figura 57 – Planta baixa da Adutora do Loteamento Araripina/PE no UFC 7	131
Figura 58 – Perfil da Adutora do Loteamento Araripina/PE.....	131
Figura 59 – Curva característica da bomba IMBIL ITAP	132
Figura 60 – Rebaixamento máximo do nível de água durante a simulação da Adutora da Fazenda Santa Maria	136
Figura 61 – Análise de sensibilidade do parâmetro $Kp(i)$ para o experimento da Fazenda Santa Maria.....	137
Figura 62 – Análise de sensibilidade do parâmetro ε_0 para o experimento da Fazenda Santa Maria.....	138
Figura 63 – Nível de água no TAEB ao longo do tempo de simulação no UFC 7 na Adutora da Fazenda Santa Maria.....	140
Figura 64 – Comparação da pressão na seção do TAEB nas situações sem Dispositivos e com TAEB na Adutora da Fazenda Santa Maria	141
Figura 65 – Comparação da pressão na seção da válvula de retenção nas situações sem Dispositivos e com TAEB na Adutora da Fazenda Santa Maria.....	142
Figura 66 – Comparação das envoltórias máximas e mínimas nas situações sem Dispositivos e com TAEB na Adutora da Fazenda Santa Maria	143
Figura 67 – Comparação da pressão na seção do TAEB nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Ventosa na Adutora da Fazenda Santa Maria.....	146
Figura 68 – Comparação da pressão na seção da válvula de retenção nas situações sem dispositivos, com TAEB e com Ventosa na Adutora da Fazenda Santa Maria.....	147
Figura 69 – Comparação das envoltórias máximas e mínimas nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Ventosa na Adutora da Fazenda Santa Maria.....	148
Figura 70 – Comparação da pressão na seção do TAEB nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio na Adutora da Fazenda Santa Maria	152
Figura 71 – Comparação da pressão na seção da válvula de retenção nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio na Adutora da Fazenda Santa Maria	153
Figura 72 – Comparação das envoltórias máximas e mínimas nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio na Adutora da Fazenda Santa Maria	154
Figura 73 – Simulação da Adutora de Aurora/CE com o MOC no UFC 7 sem dispositivos de proteção	157
Figura 74 – Nível de água no TAEB para cada diâmetro de Ventosa simulado ao longo do tempo de simulação no UFC 7 na Adutora de Aurora/CE	158

Figura 75 – Comparação da pressão na seção do TAEB nas situações sem Dispositivos e com TAEB na Adutora de Aurora/CE	160
Figura 76 – Comparação da pressão na seção da válvula de retenção nas situações sem Dispositivos e com TAEB na Adutora de Aurora/CE.....	161
Figura 77 – Comparação das envoltórias máximas e mínimas nas situações sem Dispositivos e com TAEB na Adutora de Aurora/CE.....	162
Figura 78 – Comparação da pressão na seção do TAEB nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Ventosa na Adutora de Aurora/CE.....	164
Figura 79 – Comparação da pressão na seção da válvula de retenção nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Ventosa na Adutora de Aurora/CE.....	165
Figura 80 – Comparação das envoltórias máximas e mínimas nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Ventosa na Adutora de Aurora/CE.....	166
Figura 81 – Comparação da pressão na seção do TAEB nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio de 3,00 metros de altura na Adutora de Aurora/CE....	169
Figura 82 – Comparação da pressão na seção da válvula de retenção nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio de 3,00 metros de altura na Adutora de Aurora/CE.....	170
Figura 83 – Comparação das envoltórias máximas e mínimas nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio de 3,00 metros de altura na Adutora de Aurora/CE	171
Figura 84 – Comparação da pressão na seção do TAEB nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio de 40,69 metros de altura na Adutora de Aurora/CE..	173
Figura 85 – Comparação da pressão na seção da válvula de retenção nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio de 40,69 metros de altura na Adutora de Aurora/CE.....	174
Figura 86 – Comparação das envoltórias máximas e mínimas nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio de 40,69 metros de altura na Adutora de Aurora/CE	175
Figura 87 – Simulação da Adutora de Alcântara/MA com o MOC no UFC 7 sem dispositivos de proteção.....	178
Figura 88 – Nível de água no TAEB (diâmetro de 150 mm) para cada diâmetro de Ventosa simulado ao longo do tempo de simulação no UFC 7 na Adutora de Alcântara/MA	179
Figura 89 – Nível de água no TAEB (diâmetro de 400 mm) para cada diâmetro de Ventosa simulado ao longo do tempo de simulação no UFC 7 na Adutora de Alcântara/MA	181

Figura 90 – Comparação da pressão na seção do TAEB nas situações sem Dispositivos e com TAEB na Adutora de Alcântara/MA	182
Figura 91 – Comparação da pressão na seção da válvula de retenção nas situações sem Dispositivos e com TAEB na Adutora de Alcântara/MA	183
Figura 92 – Comparação das envoltórias máximas e mínimas nas situações sem Dispositivos e com TAEB na Adutora de Alcântara/MA	184
Figura 93 – Comparação da pressão na seção do TAEB nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Ventosa na Adutora de Alcântara/MA	186
Figura 94 – Comparação da pressão na seção da válvula de retenção nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Ventosa na Adutora de Alcântara/MA	187
Figura 95 – Comparação das envoltórias máximas e mínimas nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Ventosa na Adutora de Alcântara/MA	188
Figura 96 – Comparação da pressão na seção do TAEB nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio na Adutora de Alcântara/MA	191
Figura 97 – Comparação da pressão na seção da válvula de retenção nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio na Adutora de Alcântara/MA	192
Figura 98 – Comparação das envoltórias máximas e mínimas nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio na Adutora de Alcântara/MA	193
Figura 99 – Simulação da Adutora de Acaraú/CE com o MOC no UFC 7 sem dispositivos de proteção	195
Figura 100 – Comparação das envoltórias máximas e mínimas nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Ventosa na Adutora de Acaraú/CE	196
Figura 101 – Comparação das envoltórias máximas e mínimas nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio na Adutora de Acaraú/CE	200
Figura 102 – Simulação da Adutora do Loteamento Araripina/PE com o MOC no UFC 7 sem dispositivos de proteção	203
Figura 103 – Comparação das envoltórias máximas e mínimas nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Ventosa na Adutora do Loteamento Araripina/PE	204
Figura 104 – Comparação das envoltórias máximas e mínimas nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio na Adutora do Loteamento Araripina/PE	207
Figura 105 – Posicionamento do conjunto motobomba da adutora	222
Figura 106 – Saída da adutora após a captação no manancial	222
Figura 107 – Construção da derivação onde foi instalado o TAEB	223

Figura 108 – Posicionamento do bloco de ancoragem do TAEB.....	223
Figura 109 – Posicionamento do TAEB.....	224
Figura 110 – Disposição final do TAEB, após o reaterro das valas e instalação do tubo de acrílico	224
Figura 111 – Criação do arquivo .inp no UFC 2	225
Figura 112 – Seleção do tipo de sistema hidráulico no UFC 2	226
Figura 113 – Simulação do EPANET.....	226
Figura 114 – Geração do relatório completo após a simulação do EPANET	227
Figura 115 – Aspecto típico do arquivo .pro	227
Figura 116 – Modificação do tipo de arquivo a ser aberto no UFC 7	228
Figura 117 – Arquivo da adutora aberto no UFC 7	228
Figura 118 – Simulação da adutora sem dispositivos.....	229
Figura 119 – Resultado da simulação sem dispositivos e indicação do ponto de menor pressão da adutora	230
Figura 120 – Inserção do TAEB no nó desejado.....	231
Figura 121 – Janela de configuração do TAEB no UFC 7	232
Figura 122 – Janela de configuração da Ventosa no TAEB no UFC 7	233
Figura 123 – Janela contendo as curvas de Ventosa com DN = 25 mm disponíveis no UFC 7	233
Figura 124 – TAEB corretamente inserido no nó desejado.....	234
Figura 125 – Ferramenta para visualização dos resultados de vazão, carga e pressão nos nós	235
Figura 126 – Janela de visualização de resultados de vazão, carga e pressão.....	235
Figura 127 – Botão para visualização do resultado de rebaixamento do nível de água no TAEB.....	236
Figura 128 – Rebaixamento do nível de água ao longo do tempo de simulação no TAEB ...	236

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre as soluções convencionais para proteção contra transientes e TAEB.....	50
Tabela 2 – Comparação entre os softwares Hammer, Allievi e UFC 7.....	51
Tabela 3 – Dados de entrada da Adutora da Fazenda Santa Maria	113
Tabela 4 – Materiais presentes na Adutora da Fazenda Santa Maria	113
Tabela 5 – Dados acerca das tubulações da Adutora da Fazenda Santa Maria	114
Tabela 6 – Dados da simulação da Adutora da Fazenda Santa Maria.....	114
Tabela 7 – Dados do TAEB construído para a Adutora da Fazenda Santa Maria	115
Tabela 8 – Curva característica da bomba EBARA GSD 40-250 30CV	117
Tabela 9 – Dados de entrada da Adutora de Aurora/CE	119
Tabela 10 – Distribuição de diâmetros na Adutora de Aurora/CE.....	119
Tabela 11 – Dados acerca das tubulações da Adutora de Aurora/CE	120
Tabela 12 – Dados da simulação da Adutora de Aurora/CE.....	120
Tabela 13 – Curva característica da bomba da Adutora de Aurora/CE.....	122
Tabela 14 – Dados de entrada da Adutora de Alcântara/MA.....	123
Tabela 15 – Dados acerca das tubulações da Adutora de Alcântara/MA.....	123
Tabela 16 – Dados da simulação da Adutora de Alcântara/MA	123
Tabela 17 – Curva característica da bomba KSB 40-315.....	125
Tabela 18 – Dados de entrada da Adutora de Acaraú/CE	126
Tabela 19 – Dados acerca das tubulações da Adutora de Acaraú/CE	126
Tabela 20 – Dados da simulação da Adutora de Acaraú/CE.....	126
Tabela 21 – Curva característica da bomba Flygt MT	129
Tabela 22 – Dados de entrada da Adutora do Loteamento Araripina/PE	130
Tabela 23 – Dados acerca das tubulações da Adutora do Loteamento Araripina/PE	130
Tabela 24 – Dados da simulação da Adutora do Loteamento Araripina/PE	130
Tabela 25 – Curva característica da bomba IMBIL ITAP.....	132
Tabela 26 – Análise estatística do parâmetro $Kp(i)$ para o experimento da Fazenda Santa Maria.....	138
Tabela 27 – Análise estatística do parâmetro ε_0 para o experimento da Fazenda Santa Maria	139
Tabela 28 – Pressões máximas e mínimas da Adutora da Fazenda Santa Maria	144

Tabela 29 – Pressões máximas e mínimas da Adutora da Fazenda Santa Maria – Comparação com Ventosa	149
Tabela 30 – Dados da Chaminé de Equilíbrio simulada na Adutora da Fazenda Santa Maria	151
Tabela 31 – Pressões máximas e mínimas da Adutora da Fazenda Santa Maria – Comparação com Chaminé de Equilíbrio.....	154
Tabela 32 – Dados do TAEB simulado na Adutora de Aurora/CE.....	158
Tabela 33 – Dados da Ventosa do TAEB simulado na Adutora de Aurora/CE.....	159
Tabela 34 – Pressões máximas e mínimas da Adutora de Aurora/CE	163
Tabela 35 – Pressões máximas e mínimas da Adutora de Aurora/CE – Comparação com Ventosa	167
Tabela 36 – Dados da Chaminé de Equilíbrio simulada na Adutora de Aurora/CE	168
Tabela 37 – Pressões máximas e mínimas da Adutora de Aurora/CE – Comparação com Chaminé de Equilíbrio com altura de 3,00 metros	172
Tabela 38 – Pressões máximas e mínimas da Adutora de Aurora/CE – Comparação com Chaminé de Equilíbrio com altura de 40,69 metros	176
Tabela 39 – Comparação entre os dados das Adutoras de Aurora/CE e Alcântara/MA	180
Tabela 40 – Dados da Ventosa do TAEB simulado na Adutora de Alcântara/MA	181
Tabela 41 – Pressões máximas e mínimas da Adutora de Alcântara/MA.....	185
Tabela 42 – Pressões máximas e mínimas da Adutora de Alcântara/MA – Comparação com Ventosa	189
Tabela 43 – Dados da Chaminé de Equilíbrio simulada na Adutora de Alcântara/MA.....	190
Tabela 44 – Pressões máximas e mínimas da Adutora de Alcântara/MA – Comparação com Chaminé de Equilíbrio.....	194
Tabela 45 – Dados do TAEB simulado na Adutora de Acaraú/CE.....	196
Tabela 46 – Pressões máximas e mínimas da Adutora de Acaraú/CE – Comparação com Ventosa	197
Tabela 47 – Dados da Chaminé de Equilíbrio simulada na Adutora de Acaraú/CE.....	199
Tabela 48 – Pressões máximas e mínimas da Adutora de Acaraú/CE – Comparação com Chaminé de Equilíbrio.....	201
Tabela 49 – Dados do TAEB simulado na Adutora do Loteamento Araripina/PE.....	204
Tabela 50 – Pressões máximas e mínimas da Adutora do Loteamento Araripina/PE – Comparação com Ventosa	205

Tabela 51 – Dados da Chaminé de Equilíbrio simulada na Adutora do Loteamento Araripina/PE	206
Tabela 52 – Pressões máximas e mínimas da Adutora do Loteamento Araripina/PE – Comparação com Chaminé de Equilíbrio.....	208

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFD	<i>Computacional Fluid Dynamics</i> (Dinâmica de Fluidos Computacional, em português)
CMVWD	<i>Cavitation Method with Voids and Wave Damping</i> (Método da Cavitação com Vazios e Amortecimento de Ondas, em português)
DGCM	<i>Discrete Gas Cavity Model</i> (Método da Cavidade de Gás Livre Discreto, em português)
DVCM	<i>Discrete Vapor Cavity Model</i> (Método da Cavidade de Vapor Discreto, em português)
EDO	Equação Diferencial Ordinária
EDP	Equação Diferencial Parcial
EPANET	<i>Environmental Protection Agency Network</i> (software utilizado para modelagem e simulação de sistemas de distribuição de água)
EQM	Erro Quadrático Médio
LAHC	Laboratório de Hidráulica Computacional
MOC	<i>Method of Characteristics</i> (Método das Características, em português)
NPT	Número de Passo de Tempo
NSE	Coeficiente de Nash-Sutcliffe
PRV	<i>Pressure Relief Valve</i> (Válvula de Alívio de Pressão, em português)
RHO	Reservatório Hidropneumático
SWMM	<i>Storm Water Management Model</i> (software utilizado para modelagem de sistemas de drenagem urbana)
TAEB	Tubo de Admissão e Expulsão Bidirecional
TAU	Tanque de Alimentação Unidirecional
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFC 2	Sistema UFC – Módulo 2 (voltado para traçado de redes, adutoras e linhas de recalque de esgoto)
UFC 3	Sistema UFC – Módulo 3 (voltado para inserção e detalhamento de conexões de redes de água e traçado de perfil de adutoras)
UFC 4	Sistema UFC – Módulo 4 (voltado para dimensionamento e otimização de redes de água)

UFC 5	Sistema UFC – Módulo 5 (voltado para seleção de bombas hidráulicas em adutoras e estações elevatórias de esgoto)
UFC 6	Sistema UFC – Módulo 6 (antigo módulo voltado para soluções em hidráulica transiente)
UFC 7	Sistema UFC – Módulo 7 (voltado para soluções em hidráulica transiente)
UFC 8	Sistema UFC – Módulo 8 (voltado para traçado e dimensionamento de redes de drenagem urbana)
UFC 9	Sistema UFC – Módulo 9 (voltado para traçado e dimensionamento de redes e estações elevatórias de esgoto)
UFC 10	Sistema UFC – Módulo 10 (voltado para simulações de qualidade de água)
UFC 11	Sistema UFC – Módulo 11 (voltado para traçado automatizado dos divisores e talvegues de bacias hidrográficas)
UFC 12	Sistema UFC – Módulo 12 (voltado para otimização do custo energético de estações elevatórias de água)
UFC-FLOW	Sistema UFC – Módulo FLOW (voltado para problemas de cálculos em Hidrogeologia)

LISTA DE SÍMBOLOS E VARIÁVEIS

Símbolos Alfabéticos

a	Celeridade da onda - $[L T^{-1}]$
a_1	Parâmetro do cálculo do transiente da bomba centrífuga a montante - adimensional
a_2	Parâmetro do cálculo do transiente da bomba centrífuga a montante - adimensional
a_3	Parâmetro do cálculo do transiente da bomba centrífuga a montante - adimensional
a_4	Parâmetro do cálculo do transiente da bomba centrífuga a montante - adimensional
a^*	Aceleração do movimento da água na Chaminé de equilíbrio - $[L T^{-2}]$
a_0	Celeridade do líquido - $[L T^{-1}]$
a_g	Fração do gás livre - adimensional
$a_{j,k}$	Celeridade da onda no passo de tempo atual no tubo i e seção j - $[L T^{-1}]$
a_m	Celeridade da mistura - $[L T^{-1}]$
A	Área da seção transversal do tubo - $[L^2]$
A_{adm}	Área do orifício da Ventosa para entrada de ar - $[L^2]$
$A_{cham}(i)$	Área da seção transversal da Chaminé de Equilíbrio do trecho i - $[L^2]$
A_{exp}	Área do orifício da Ventosa para saída de ar - $[L^2]$
AO_{cham}	Área do orifício da Chaminé de Equilíbrio do trecho i - $[L^2]$
B	Parâmetro de cálculo do regime transiente de Wylie e Streeter (1993) - $[T L^{-2}]$
B_1	Coeficiente de cálculo do transiente da Chaminé de Equilíbrio - $[L]$
B_2	Coeficiente de cálculo do transiente da Chaminé de Equilíbrio - $[L^2 T^{-1}]$
B_3	Coeficiente de cálculo do transiente da Chaminé de Equilíbrio - $[L]$
B_4	Coeficiente de cálculo do transiente da Chaminé de Equilíbrio - $[T L^{-2}]$
B_5	Coeficiente de cálculo do transiente da Chaminé de Equilíbrio - $[L^3 T^{-1}]$
B_6	Coeficiente de cálculo do transiente da Chaminé de Equilíbrio - $[L^2 T^{-1}]$
c_l	Parâmetro de ancoragem do tubo - adimensional
C^*	Coeficiente de decaimento de cisalhamento de Vardy - adimensional
C_6	Parâmetro de cálculo do transiente da bomba centrífuga a montante - $[M L^{-3}]$

C_7	Parâmetro de cálculo do transiente da bomba centrífuga a montante - adimensional
C_8	Parâmetro de cálculo do transiente da bomba centrífuga a montante - adimensional
C_a	Parâmetro de cálculo do transiente de Chaudhry (2014) - $[L^2 T^{-1}]$
C_{a_i}	Parâmetro de cálculo do transiente de Chaudhry (2014) para o tubo i - $[L^2 T^{-1}]$
$C_{a_{i+1}}$	Parâmetro de cálculo do transiente de Chaudhry (2014) para o tubo $i + 1$ - $[L^2 T^{-1}]$
C_{a_p}	Parâmetro de cálculo do transiente de Chaudhry (2014) para a seção a montante - $[L^2 T^{-1}]$
C_{a_n}	Parâmetro de cálculo do transiente de Chaudhry (2014) para a seção a jusante - $[L^2 T^{-1}]$
$C_a(i)$	Parâmetro de cálculo do transiente de Chaudhry (2014) para o tubo i - $[L^2 T^{-1}]$
$C_a(j)$	Parâmetro de cálculo do transiente de Chaudhry (2014) para o tubo j - $[L^2 T^{-1}]$
C_{adm}	Coefficiente de descarga da Ventosa para entrada de ar - adimensional
C_{air}	Coefficiente de cálculo da Ventosa - $[L^3]$
C_{exp}	Coefficiente de descarga da Ventosa para saída de ar - adimensional
C_M	Parâmetro de cálculo da equação característica negativa de Wylie e Streeter (1993) - $[L]$
C_n	Número de Courant - adimensional
C_N	Parâmetro de cálculo da equação característica negativa de Chaudhry (2014) - $[L^3 T^{-1}]$
$C_{N_{i+1}}$	Parâmetro de cálculo da equação característica negativa de Chaudhry (2014) para o tubo $i + 1$ - $[L^3 T^{-1}]$
$C_N(j, 1)$	Parâmetro de cálculo da equação característica negativa de Chaudhry (2014) no trecho j , seção 1 - $[L^3 T^{-1}]$
C_p	Parâmetro de cálculo da equação característica positiva de Chaudhry (2014) - $[L^3 T^{-1}]$
C_{p_i}	Parâmetro de cálculo da equação característica positiva de Chaudhry (2014) para o tubo i - $[L^3 T^{-1}]$
$C_p(i, k)$	Parâmetro de cálculo da equação característica positiva de Chaudhry (2014) no trecho i , seção k - $[L^3 T^{-1}]$

C_{PW}	Parâmetro de cálculo da equação característica positiva de Wylie e Streeter (1993) - [L]
C_v	Coefficiente de perda de carga na válvula de retenção - adimensional
C^+	Equação característica positiva - adimensional
C^-	Equação característica negativa - adimensional
D	Diâmetro do conduto – [L]
$D_{cham}(i)$	Diâmetro da Chaminé de Equilíbrio no trecho i - [L]
D_{lig}	Diâmetro do tubo de ligação da Chaminé de Equilíbrio - [L]
e	Espessura das paredes do conduto – [L]
f	Fator de atrito - adimensional
F	Força que atua no movimento da água na Chaminé de Equilíbrio - [M L T ⁻²]
F_1	Função de cálculo do transiente da bomba centrífuga a montante - [L ³ T ⁻¹]
F_2	Função de cálculo do transiente da bomba centrífuga a montante - [L ³ T ⁻¹]
$F_{cham}(i)$	Fator de atrito das paredes da Chaminé de Equilíbrio no trecho i - adimensional
FAD	Força de atrito distribuído aplicado à massa de fluido - [M L T ⁻²]
FAL	Força de atrito localizado aplicado à massa de fluido - [M L T ⁻²]
g	Aceleração da gravidade - [L T ⁻²]
h	Parâmetro referente à carga de bombeamento da bomba centrífuga a montante - adimensional
H	Carga máxima admissível - [L]
H_A	Cota piezométrica na seção anterior no passo de tempo anterior no regime transiente - [L]
H_B	Cota piezométrica na seção posterior no passo de tempo anterior no regime transiente - [L]
H_{BAR}	Altura barométrica - [L]
$H_{cham}(i)$	Nível de água da Chaminé do trecho i no passo de tempo anterior - [L]
H_P	Cota piezométrica na seção atual no passo de tempo atual no regime transiente - [L]
$H_{P_{i,1}}$	Cota piezométrica no passo de tempo atual para o tubo i e seção 1 no regime transiente - [L]
$H_{P_{i,n+1}}$	Cota piezométrica no passo de tempo atual para o tubo i e seção $n + 1$ no regime transiente - [L]

$H_{P_{i+1,1}}$	Cota piezométrica no passo de tempo atual para o tubo $i + 1$ e seção 1 no regime transiente - [L]
H_R	Carga de bombeamento da bomba centrífuga a montante nas condições nominais - [L]
H_{res}	Cota piezométrica no reservatório no regime permanente - [L]
H_{suc}	Altura do reservatório de sucção - [L]
$HP(i, k)$	Cota piezométrica no trecho i , seção k , no passo de tempo atual - [L]
$HP(j, 1)$	Cota piezométrica no trecho j , seção 1, no passo de tempo atual - [L]
I	Momento de inércia polar combinado de bomba, motor, eixo e fluido que entra no rotor da bomba centrífuga a montante - [L ⁴]
J	Termo do atrito - [L T ⁻²]
J_q	Termo do atrito permanente - [L T ⁻²]
J_u	Termo do atrito variável - [L T ⁻²]
k_3	Coefficiente de atrito de Brunone - [-]
K	Módulo de elasticidade volumétrica do fluido - [M L ⁻¹ T ⁻²]
K_1	Coefficiente de cálculo da Ventosa - [L ²]
K_2	Coefficiente de cálculo da Ventosa - [M ⁻¹]
K_3	Coefficiente de cálculo da Ventosa - adimensional
$K_p(i)$	Coefficiente de perda localizada no orifício da Chaminé de Equilíbrio no trecho i - adimensional
L, L_1, L_2	Operadores lineares do MOC - adimensional
L_{TAEB}	Comprimento da estrutura do TAEB - [L]
m	Massa do fluido contido na extensão da Chaminé de Equilíbrio - [M]
$\dot{m}$	Vazão mássica para entrada/saída de ar - [M T ⁻¹]
m_0	Massa no início do intervalo de tempo - [M]
M_g	Massa de gás livre - [M]
n	Número de trechos de cálculo - adimensional
n_a	Constante anisotrópica - adimensional
n_o	Total de dados observados - adimensional
n_p	Número de bombas em paralelo - adimensional
N	Velocidade de rotação da bomba centrífuga a montante - [L T ⁻¹]
N_R	Velocidade de rotação da bomba centrífuga a montante nas condições nominais - adimensional

N_s	Velocidade específica da bomba centrífuga a montante - $[T^{-1}]$
NA_{cham}	Nível de água no TAEB no início da simulação - $[L]$
NA_p	Nível de água no TAEB no passo de tempo atual - $[L]$
P	Pressão absoluta dentro da tubulação - $[M L^{-1} T^{-2}]$
P_0	Pressão atmosférica fora da tubulação - $[M L^{-1} T^{-2}]$
P_g^*	Pressão absoluta do gás - $[M L^{-1} T^{-2}]$
$P_{j,k}$	Pressão no passo de tempo atual no tubo i e seção j - $[M L^{-1} T^{-2}]$
$P_{j,k-\Delta t}$	Pressão no passo de tempo anterior no tubo i e seção j - $[M L^{-1} T^{-2}]$
P_m^*	Pressão absoluta da mistura - $[M L^{-1} T^{-2}]$
Q	Vazão volumétrica do fluido do tubo no regime permanente - $[L^3 T^{-1}]$
$Q_{i+1,1}$	Vazão no passo de tempo anterior para o tubo $i + 1$ e seção 1 no regime transiente - $[L^3 T^{-1}]$
$Q_{i,j+1}$	Vazão no passo de tempo anterior para o tubo i e seção $j + 1$ no regime transiente - $[L^3 T^{-1}]$
Q_A	Vazão na seção anterior no passo de tempo anterior no regime transiente - $[L^3 T^{-1}]$
Q_B	Vazão na seção posterior no passo de tempo anterior no regime transiente - $[L^3 T^{-1}]$
$Q_{cham}(i)$	Vazão que entra ou sai da Chaminé de Equilíbrio no trecho i no passo de tempo anterior - $[L^3 T^{-1}]$
Q_P	Vazão na seção atual no passo de tempo atual no regime transiente - $[L^3 T^{-1}]$
$Q_{P_{i,1}}$	Vazão no passo de tempo atual para o tubo i e seção 1 no regime transiente - $[L^3 T^{-1}]$
$Q_{P_{i+1,1}}$	Vazão no passo de tempo atual para o tubo $i + 1$ e seção 1 no regime transiente - $[L^3 T^{-1}]$
$Q_{P_{i,j+1}}$	Vazão no passo de tempo atual para o tubo i e seção $j + 1$ no regime transiente - $[L^3 T^{-1}]$
$Q_{P_{i,n+1}}$	Vazão no passo de tempo atual para o tubo i e seção $n + 1$ no regime transiente - $[L^3 T^{-1}]$
Q_{Pd}	Vazão a jusante na seção computacional - $[L^3 T^{-1}]$
Q_{Pu}	Vazão a montante na seção computacional - $[L^3 T^{-1}]$
$QP(i, k)$	Vazão no trecho i , seção k , no passo de tempo atual - $[L^3 T^{-1}]$
$QP(j, 1)$	Vazão no trecho j , seção 1, no passo de tempo atual - $[L^3 T^{-1}]$

$QP_{cham}(i)$	Vazão que entra ou sai da Chaminé de Equilíbrio no trecho i no passo de tempo atual - $[L^3 T^{-1}]$
Q_R	Vazão da bomba centrífuga a montante nas condições nominais - $[L^3 T^{-1}]$
R	Constante do gás - $[M L^2 T^{-2} \theta^{-1} n^{-1}]$
Re	Número de Reynolds - adimensional
$sign(Q)$	Sinal do sentido da vazão - adimensional
t	Tempo - $[T]$
T	Torque da bomba - $[M L^2 T^{-2}]$
T_0	Temperatura externa à tubulação - $[\theta]$
T_{abs}	Temperatura absoluta - $[\theta]$
T_i	Temperatura interna da tubulação - $[\theta]$
T_R	Torque da bomba centrífuga a montante nas condições nominais - $[M L^2 T^{-2}]$
V	Velocidade média do fluido na seção transversal do tubo - $[L T^{-1}]$
V_{exp}	Volume de ar expulso - $[L^3]$
V_C	Volume da cavidade no final do passo de tempo - $[L^3]$
V_i	Volume da cavidade no início do passo de tempo - $[L^3]$
V_m	Volume da mistura - $[L^3]$
W	Peso da massa de fluido - $[M L T^{-2}]$
x	Espaço no eixo x - $[L]$
y_o	Valor observado - adimensional
$\overline{y_o}$	Média dos valores observados - adimensional
y_s	Valor simulado - adimensional
z	Elevação do eixo da tubulação - $[L]$
$z_{cham}(i)$	Cota da base da Chaminé de Equilíbrio no trecho i - $[L]$

Símbolos Gregos

α	Parâmetro referente à velocidade de rotação da bomba centrífuga a montante - adimensional
α_{DGCM}	Adimensional do modelo DGCM - adimensional
β	Parâmetro referente ao torque da bomba centrífuga a montante - adimensional
γ	Peso específico do ar - $[M L^{-2} T^{-2}]$
γ_F	Peso específico do fluido - $[M L^{-2} T^{-2}]$
ΔH_{P_v}	Perda de carga na válvula de retenção no final do passo de tempo - $[L]$

ΔN_A	Variação do nível de água no TAEB - [L]
Δt	Passo de tempo - [T]
ε_0	Porcentagem inicial de ar - adimensional
$\varepsilon_{j,k}$	Fração de vazios no passo de tempo atual no tubo i e seção j - adimensional
$\varepsilon_{j,k-\Delta t}$	Fração de vazios no passo de tempo anterior no tubo i e seção j - adimensional
η_R	Eficiência da bomba centrífuga a montante nas condições nominais - adimensional
θ	Ângulo utilizado para estabilidade numérica do cálculo do regime transiente da bomba centrífuga a montante - adimensional
λ	Multiplicador da combinação linear do MOC - adimensional
Σ	Somatório - adimensional
ρ	Massa específica do fluido - [M L ⁻³]
v	Parâmetro referente à vazão da bomba centrífuga a montante - adimensional
ψ	Adimensional do modelo DGCM - adimensional
ω	Velocidade angular do rotor da bomba centrífuga a montante - [T ⁻¹]

Símbolos Diversos

∂H	Variação diferencial parcial da cota piezométrica - [L]
∂Q	Variação diferencial parcial da vazão volumétrica - [L ³ T ⁻¹]
∂t	Variação diferencial parcial do tempo - [T]
∂x	Variação diferencial parcial do espaço no eixo x - [L]
dH	Variação diferencial total da cota piezométrica - [L]
dN	Variação diferencial total da velocidade de rotação da bomba centrífuga a montante - [L T ⁻¹]
dQ	Variação diferencial total da vazão volumétrica - [L ³ T ⁻¹]
dt	Variação diferencial total do tempo - [T]
dx	Variação diferencial total do comprimento da tubulação - [L]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	33
1.1. Problematização e Contextualização	34
1.2. Justificativa.....	35
1.3. Objetivos.....	36
1.3.1. Objetivo Geral	36
1.3.2. Objetivos Específicos	37
1.4. Organização dos Capítulos	37
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	39
2.1. Estado da Arte	39
2.1.1. Análise Bibliométrica	39
2.1.2. Principais Problemas em Operação de Adutoras e Utilização de Dispositivos de Proteção contra o Golpe de Aríete.....	45
2.2. Método das Características.....	51
2.2.1. Reservatório com Nível Constante a Jusante	58
2.2.2. Bomba Centrífuga a Montante	59
2.2.3. Junção de Dois Trechos	69
2.3. Dispositivos de Proteção contra o Golpe de Aríete.....	70
2.3.1. Chaminés de Equilíbrio	71
2.3.2. Tanques de Alimentação Unidirecional	72
2.3.3. Reservatórios Hidropneumáticos.....	74
2.3.4. Válvulas de Alívio	75
2.3.5. Ventosas.....	76
2.3.6. Válvulas de Retenção	78
2.3.7. Volantes de Inércia	81
2.4. Modelos de Cavitação, Fator de Atrito e Celeridade Variáveis aplicados ao Cálculo do Regime Transiente.....	82

2.4.1. Fluxo Bifásico e Cavitação	83
2.4.2. Modelo DGCM.....	84
2.4.3. Celeridade Variável com Modelo Politrópico Termodinâmico	85
2.4.4. Modelos de Fator de Atrito Variável: Aceleração Instantânea.....	86
2.4.5. Método da Cavitação com Vazios e Amortecimento de Ondas (CMVWD).....	88
2.5. Módulos do Sistema UFC	88
2.6. Síntese do Referencial Teórico e bases para a modelagem do TAEB	97
3. METODOLOGIA.....	99
3.1. Modelagem do Transitório Hidráulico	100
3.2. Modelagem da Ventosa	101
3.3. Modelagem da Chaminé de Equilíbrio considerando limitação de altura.....	104
3.4. Compatibilização entre os Modelos	109
3.5. Fluxograma Metodológico	111
3.6. Sistemas de Adução simulados	112
3.6.1. Adutora da Fazenda Santa Maria.....	112
3.6.1.1. Procedimento de Validação e Análise de Sensibilidade	117
3.6.2. Adutora de Aurora/CE.....	119
3.6.3. Adutora de Alcântara/MA	122
3.6.4. Adutora de Acaraú/CE.....	126
3.6.5. Adutora do Loteamento Araripina/PE.....	129
3.6.6. Diretrizes para as Simulações do UFC 7 e Critérios de Avaliação de Desempenho do TAEB.....	133
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	136
4.1. Adutora da Fazenda Santa Maria	136
4.1.1. Validação do Modelo.....	137
4.1.2. Comparação com Situação sem Dispositivos de Proteção	141
4.1.3. Comparação com Ventosa	146
4.1.4. Comparação com Chaminé de Equilíbrio.....	151

4.2. Adutora de Aurora/CE.....	157
4.2.1. Comparação com Situação sem Dispositivos de Proteção	157
4.2.2. Comparação com Ventosa	164
4.2.3. Comparação com Chaminé de Equilíbrio.....	168
4.2.3.1. Simulação com Chaminé de Equilíbrio com 3,00 metros de altura.....	168
4.2.3.2. Simulação com Chaminé de Equilíbrio com 40,69 metros de altura.....	173
4.3. Adutora de Alcântara/MA	177
4.3.1. Comparação com Situação sem Dispositivos de Proteção	177
4.3.1.1. Simulação com diâmetro do TAEB de 150 mm	178
4.3.1.2. Simulação com diâmetro do TAEB de 400 mm	180
4.3.2. Comparação com Ventosa	186
4.3.3. Comparação com Chaminé de Equilíbrio.....	190
4.4. Adutora de Acaraú/CE	195
4.4.1. Comparação com Ventosa	195
4.4.2. Comparação com Chaminé de Equilíbrio.....	199
4.5. Adutora do Loteamento Araripina/PE.....	203
4.5.1. Comparação com Ventosa	203
4.5.2. Comparação com Chaminé de Equilíbrio.....	206
4.6. Resumo Comparativo dos Resultados do TAEB frente aos Dispositivos Convencionais	209
5. CONCLUSÕES.....	211
5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros	214
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	215
ANEXO A – REGISTRO FOTOGRÁFICO DA CONSTRUÇÃO DA ADUTORA DA FAZENDA SANTA MARIA COM A INSTALAÇÃO DO TAEB.....	222
APÊNDICE A – INTERFACE DO UFC 7 COM O USUÁRIO COM A INSERÇÃO DO TAEB	225

1. INTRODUÇÃO

Sistemas hidráulicos de abastecimento de água apresentam o intuito de transportar água de um local para outro, seja por gravidade ou por bombeamento, a depender da topografia existente (TEIXEIRA *et al.*, 2022). Esses sistemas são constituídos de tubulações, conexões, válvulas, bombas, reservatórios, dentre outros.

Na fase de projeto, os sistemas são dimensionados para operar predominantemente no regime permanente, em que é possível determinar pressão e vazão ao longo do tempo em toda a sua extensão (TEIXEIRA *et al.*, 2022). Entretanto, algumas manobras de operação rotineiras, emergenciais ou acidentais, como fechamentos de válvulas ou desligamentos de bombas, geram perturbações no fluxo desses sistemas, provocando o regime transiente, no qual a pressão e a vazão variam ao longo do tempo (KANDIL; KAMAL; EL-SAYED, 2020). Quando essas variações são muito abruptas, gera-se o golpe de aríete, que é bastante prejudicial para a integridade física dos sistemas hidráulicos. De tal forma a mitigar os efeitos causados pelo golpe de aríete, foram concebidos, ao longo dos anos, diversos dispositivos de atenuação contra o golpe de aríete, cuja utilização depende de pré-dimensionamentos.

Dentre as soluções convencionais de proteção, destacam-se as Chaminés de Equilíbrio e as Ventosas. As Chaminés oferecem grande confiabilidade operacional, pois conseguem controlar a oscilação de massa de água que ocorre durante o transiente, porém necessitam de grandes dimensões, o que limita a sua aplicação para qualquer sistema hidráulico. Já as Ventosas operam admitindo ou expulsando ar. Embora sejam menores e economicamente mais viáveis, caso essas duas operações ocorram de forma descontrolada, a adutora pode sofrer com problemas de cavitação ou golpes de aríete.

Portanto, nesse cenário de busca por soluções que tentam conciliar confiabilidade técnica e viabilidade econômica, o presente trabalho trata da modelagem computacional da condição de contorno de Ventosa com tubo prolongado conectado a sistemas de distribuição de água como forma de proteção contra o golpe de aríete. Para essa nova condição de contorno, foi adotada a denominação de Tubo de Admissão e Expulsão Bidirecional (TAEB).

Foram realizados alguns testes em configurações distintas de adutoras, variando-se o tipo de material, o perfil topográfico, a altura manométrica da bomba, o comprimento e o diâmetro da tubulação. Em seguida, foram efetuados comparativos entre a situação de regime transiente sem dispositivos de atenuação e a situação do sistema com a nova condição proposta para verificar a efetividade do dispositivo em termos de envoltórias de pressão nas principais seções computacionais do cálculo. O TAEB também foi testado em comparação com Ventosas

e Chaminés de Equilíbrio, já que o modelo numérico desenvolvido neste trabalho se baseou na combinação simultânea desses dois dispositivos.

A modelagem foi realizada por meio do uso do Sistema UFC em seu módulo 7, que trata do cálculo do transitório hidráulico presente nesse sistema. O UFC 7 utiliza a linguagem Java, portanto, foi desenvolvido um algoritmo nessa linguagem para se adequar às equações ilustradas na metodologia deste trabalho.

Este trabalho baseou-se nas seguintes hipóteses: a adição do tubo prolongado preenchido com água, conectando a Ventosa com a adutora, pode reduzir a entrada de ar de forma descontrolada e prevenir a ocorrência de pressões negativas na seção do TAEB durante o golpe de aríete; e o pré-dimensionamento adequado do dispositivo de proteção, considerando parâmetros hidráulicos relevantes, é fundamental para garantir sua eficácia na mitigação do golpe de aríete e evitar danos físicos. A modelagem numérica/computacional do dispositivo proposto neste trabalho baseou-se na seguinte hipótese: o Tubo de Admissão e Expulsão Bidirecional (TAEB), inserido no nó da adutora, foi representado como a compatibilização de dois modelos numéricos de dispositivos: a Chaminé de Equilíbrio e a Ventosa. Ademais, a modelagem foi desenvolvida com a utilização do cálculo de transientes que considera a presença de ar no sistema, ou seja, o modelo de cavitação.

Nessa hipótese, entende-se que a coluna líquida presente no tubo prolongado varia ao longo do transitório hidráulico, em função da admissão e expulsão de ar promovidos pela Ventosa. Esse é um outro fenômeno explorado por este trabalho, averiguando qual seria a altura ideal do tubo prolongado para garantir que o dispositivo funcione adequadamente.

Como forma de embasamento do tema proposto, este trabalho discorre sobre os seguintes temas: demonstração das equações do MOC, apresentação das condições de contorno utilizadas, apresentação da modelagem de Ventosas atualmente desenvolvida pelo UFC 7 e demonstração da metodologia desenvolvida para a obtenção dos resultados.

1.1. Problemática e Contextualização

O golpe de aríete é um fenômeno que pode ocorrer nas adutoras de água devido a fechamentos rápidos de válvulas ou desligamentos bruscos de bombas. É um regime de escoamento do tipo transitório, que gera grandes oscilações de pressões e vazões ao longo da linha da adutora e ao longo do tempo. A depender da velocidade da onda, os equipamentos presentes na adutora sofrem riscos de serem danificados tanto pela alta pressão (podendo provocar o colapso do material ou vazamentos nas conexões da tubulação) como pela baixa

pressão (que podem gerar bolsões de ar na seção da tubulação e/ou esmagamento nas paredes da tubulação). Tais condições podem gerar riscos físicos, financeiros, materiais e até perdas humanas (DAUDE; TIJSSELING; GALON, 2018 apud NETO, 2019). Esse fenômeno, na forma que ocorre em condutos fechados, tem sido objeto de estudo teórico e prático por mais de 100 anos (SU; CAMARA, 2003 apud CHOON et al., 2012), devido ao entendimento de que a sua compreensão e correta prevenção podem evitar as perdas citadas.

Para evitar maiores danos à tubulação e aos componentes presentes nas adutoras, são instalados dispositivos de proteção contra o golpe de aríete, cuja função é amenizar a severidade do golpe. No entanto, para que os dispositivos possam cumprir sua função proposta, eles devem ser pré-dimensionados adequadamente e o cálculo do transiente hidráulico deve prever a ação desses dispositivos na adutora. Mesmo após décadas de estudo, a seleção de dispositivos de proteção ainda não é totalmente compreendida e necessita de novas pesquisas voltadas para preencher essa lacuna científica.

Dentre os dispositivos existentes, há as Ventosas, cuja função é admitir e expulsar determinada quantidade de ar durante a passagem das ondas de subpressão e sobrepressão, respectivamente. Eventualmente, a entrada excessiva de ar nas Ventosas pode resultar em pressões negativas na adutora, levando a problemas como a separação da coluna líquida por cavitação. Por outro lado, a expulsão descontrolada de ar também pode gerar problemas, como golpes de aríete provocados pelo fechamento abrupto da Ventosa. Portanto, é necessário investigar uma solução para evitar danos causados pela cavitação e melhorar a eficácia da proteção contra o golpe de aríete.

Este trabalho, portanto, propõe a concepção do TAEB de forma a reduzir a possibilidade de danos causados pela cavitação. O pré-dimensionamento adequado desse dispositivo e o cálculo preciso do transiente hidráulico são essenciais para garantir a eficácia da proteção contra o golpe de aríete.

1.2. Justificativa

Ar aprisionado em adutoras é um problema clássico no tocante a transitórios hidráulicos, cuja consequência é a ruptura de tubulações com consequências econômicas bastante onerosas. Além disso, os bolsões de ar podem reduzir a vazão original calculada durante o regime permanente, prejudicar a eficácia da bomba, gerar erros nas medições de vazão, dentre outras consequências (CHAIKO; BRINCKMAN, 2012; LAUCLAN *et al.*, 2005 apud CARLOS *et al.*, 2011). As Ventosas, portanto, quando selecionadas para

proporcionar atenuação do golpe de aríete, necessitam de cuidado na fase de planejamento de projeto, uma vez que podem ser excelentes soluções, mas, quando dimensionadas incorretamente, geram consequências desastrosas para as adutoras.

Como uma alternativa ao controle de entrada e saída de ar por meio das Ventosas, este trabalho é relevante por proporcionar uma solução para a atenuação de golpe de aríete tão eficaz quanto Chaminés de Equilíbrio, mas economicamente mais acessível para os projetistas e construtores, uma vez que se entende que as Chaminés de Equilíbrio apresentam grandes diâmetros e alturas, enquanto que o TAEB apresenta essas características físicas de forma reduzida, pois a Ventosa instalada em seu topo cumpre a função de admissão e expulsão de ar, não sendo necessária uma grande elevação na estrutura do TAEB.

Para García-Todolí *et al.* (2018), o efeito mais importante da presença de ar é o aumento de pressão originado por bolsões de ar aprisionados dentro da tubulação. O movimento da água pode comprimir o ar aprisionado e gerar pressões que ultrapassam a resistência dos materiais da tubulação. O dispositivo mais característico para o controle de ar em adutoras é a Ventosa. Entretanto, não existe um controle interno nas Ventosas para bloquear a entrada ou expulsão de grandes quantidades de ar. Em relação à expulsão de ar, alguns tipos de Ventosa, como as Non-Slam, apresentam mecanismos para evitar grandes expulsões. Para Ventosas convencionais, a carência do dispositivo pode ser resolvida com o acréscimo do tubo prolongado, proposto na concepção do TAEB.

Portanto, este trabalho se justifica em termos econômicos, pois possibilita menores orçamentos para a construção de dispositivos de alívio, propondo uma solução eficaz de atenuação do golpe de aríete, assim como em termos técnicos, uma vez que propõe solucionar os problemas de cavitação gerados pela adoção de Ventosas.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

Investigar o desempenho do TAEB para reduzir a ocorrência de pressões negativas na adutora e minimizar os danos causados pela cavitação, por meio de avaliação de ensaio experimental e realização de estudos teóricos, a fim de propor uma solução eficiente no âmbito técnico para a proteção contra o golpe de aríete em sistemas hidráulicos de abastecimento de água.

1.3.2. Objetivos Específicos

Este trabalho apresenta como objetivos específicos:

- Implementar o modelo do TAEB computacionalmente, compatibilizando os modelos da Ventosa e da Chaminé de Equilíbrio, utilizando o Método das Características (MOC) e o software UFC 7;
- Realizar simulações numéricas para avaliar o desempenho do TAEB em adutoras, considerando diferentes condições de operação e geometrias;
- Avaliar o teste experimental realizado na Adutora da Fazenda Santa Maria para validação do modelo numérico e análise comparativa dos resultados;
- Propor um modelo otimizado que permita a utilização do TAEB como uma solução eficiente para proteção contra o golpe de aríete em adutoras de água, contribuindo para a redução dos danos causados pela cavitação.

1.4. Organização dos Capítulos

Capítulo 1 – Definição do estudo realizado, contextualização do problema, justificativa do tema e apresentação dos objetivos geral e específicos.

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica acerca do estudo do transiente hidráulico, demonstração das principais equações do Método das Características e sua solução, apresentação das condições de contorno adotadas no trabalho, descrição dos principais dispositivos atenuadores contra o golpe de aríete, discussão acerca dos modelos de solução do transiente hidráulico que consideram cavitação, fator de atrito e celeridade variáveis e apresentação dos módulos presentes no Sistema UFC.

Capítulo 3 – Exposição do método considerado para obtenção dos resultados deste trabalho, com a apresentação das equações utilizadas para a definição da condição de contorno do TAEB que foram implementadas no UFC 7.

Capítulo 4 – Apresentação e discussão dos resultados após a implementação do modelo do TAEB no UFC 7, exibindo gráficos de pressão em seções computacionais relevantes, assim como as envoltórias de máximas e mínimas pressões para todos os casos estudados. Além disso,

comparação entre os resultados obtidos apenas com Ventosa, com Chaminé de Equilíbrio e com TAEB.

Capítulo 5 – Conclusões acerca do funcionamento do TAEB em termos técnicos para projetos de sistemas hidráulicos, ilustrando também o alcance dos objetivos estabelecidos no Capítulo 1 e indicações para trabalhos futuros considerando posteriores investigações e/ou ampliações.

Anexo A – Registro fotográfico da instalação do TAEB construído na Adutora da Fazenda Santa Maria.

Apêndice A – Tutorial de utilização do UFC 7 com a inserção do TAEB em um nó desejado pelo usuário.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O presente referencial teórico busca embasar os assuntos necessários para a compreensão do fenômeno do transitório hidráulico em adutoras de água, incluindo o Método das Características (MOC) e o modelo de cavitação, além de discutir os principais dispositivos de atenuação utilizados em projetos de Engenharia. Por fim, descreve-se o Sistema UFC, com ênfase no Módulo 7, empregado na solução e no dimensionamento de adutoras considerando o regime transitório.

Como base de dados de trabalhos científicos desenvolvidos, foram pesquisados assuntos relacionados ao tema deste trabalho na plataforma *Web of Science* e *Scopus*. Esse referencial teórico também se baseia em livros consagrados do assunto, desenvolvidos por Chaudhry (2014) e Wylie e Streeter (1993).

2.1. Estado da Arte

2.1.1. Análise Bibliométrica

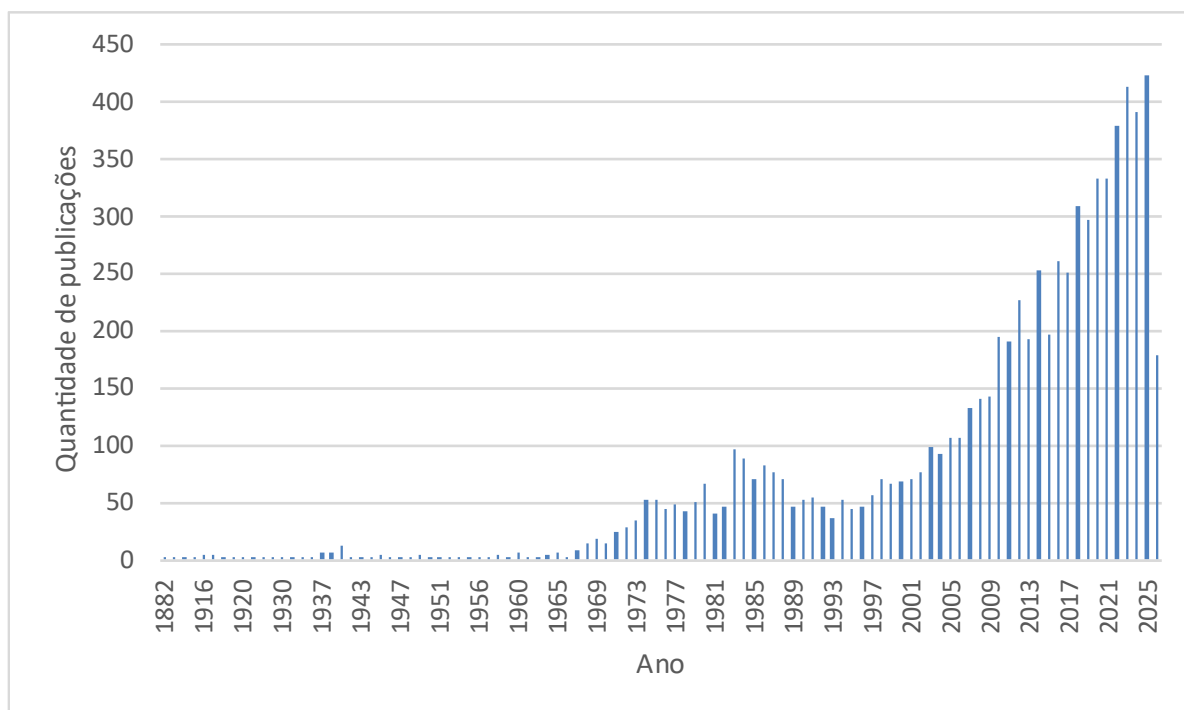
A análise bibliométrica é uma ferramenta fundamental para conhecimento das bases literárias e as lacunas do conhecimento de determinado assunto. O uso dessa metodologia possibilita uma visão quantitativa dos trabalhos estudados, os principais autores do assunto e também as palavras-chave mais utilizadas (RODRIGUES, 2014).

Inicialmente, foi realizada uma pesquisa na plataforma *Web of Science*, utilizando o termo “*water hammer*”. A busca trouxe 3.840 publicações divididas, principalmente, em artigos científicos, trabalhos em anais, artigos de revisão e capítulos de livros, considerando o período entre 1913 e 2026. Considerando alguns filtros, como a redução do período para 1993 a 2026 e os idiomas somente para inglês, português e espanhol, o tema foi citado em 3.606 trabalhos.

Em seguida, a mesma pesquisa foi realizada na plataforma *Scopus*. Essa busca trouxe 7.003 documentos relacionados ao termo “*water hammer*”, com publicações divididas entre artigos científicos, artigos de eventos, capítulos de livro, revisões de literatura, relatórios, dentre outros. Nessa base de dados, os artigos datam do ano de 1870 até 2026. Restringindo a pesquisa para os anos de 1993 a 2026 e os idiomas somente para inglês, português e espanhol, a quantidade de resultados caiu para 5.773 trabalhos.

Ressalta-se que a quantidade mais significativa de trabalhos começou a surgir a partir da década de 2000, certamente motivada pelo advento da computação e de tecnologias para a realização de ensaios experimentais. Outro fator que refletiu no crescimento da quantidade de trabalhos sobre o tema foi a motivação pelo interesse em segurança operacional de sistemas hidráulicos e pela preocupação na preservação dos meios ambiental, material e humano. Realizando a mesclagem das duas bases de dados e excluindo trabalhos repetidos, obteve-se um total de 7.620 resultados. A quantidade de publicações relacionadas ao tema “*water hammer*” obtida nas duas bases de dados ao longo dos anos pode ser encontrada na Figura 1.

Figura 1 – Publicações relacionadas ao termo “*water hammer*” em escala mundial com os dados da plataforma *Web of Science* e *Scopus* (entre 1882 e 2026)

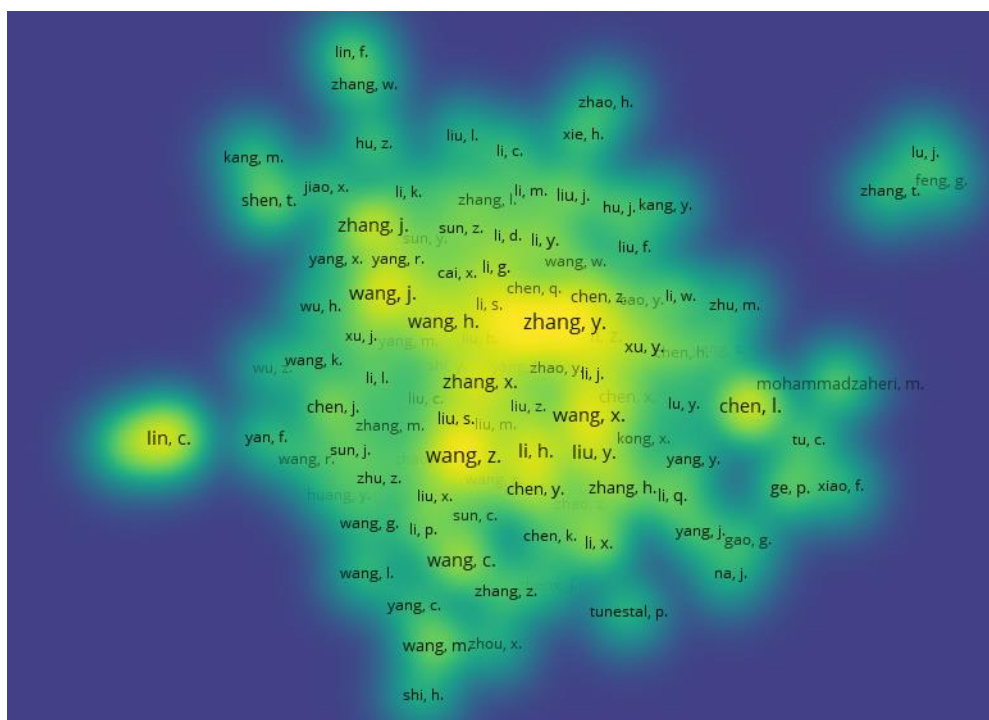


Fonte: Elaborado pelo autor com base no banco de dados das plataformas *Web of Science* e *Scopus* (2026).

Em seguida, foi realizada uma pesquisa com palavras-chave mais restritas ao tema proposto neste trabalho. Para tal, primeiramente pesquisou-se o termo “*transient control*”, que retornou um total de 694 resultados no período compreendido entre 1966 e 2026 na plataforma *Web of Science*. Já no caso da plataforma *Scopus*, essa mesma busca trouxe um total de 1.172 trabalhos. Realizando a mesclagem das duas bases e excluindo trabalhos duplicados, obteve-se um total de 1.162. Essa pesquisa mesclada das duas bases resultou na construção do mapa de

cocitações dos principais autores sobre o assunto, presente na Figura 2, utilizando-se do *software VOSviewer*.

Figura 2 – Mapa de cocitações dos autores para o termo “*transient control*” com os dados da plataforma *Web of Science* e *Scopus* (1963 – 2026)

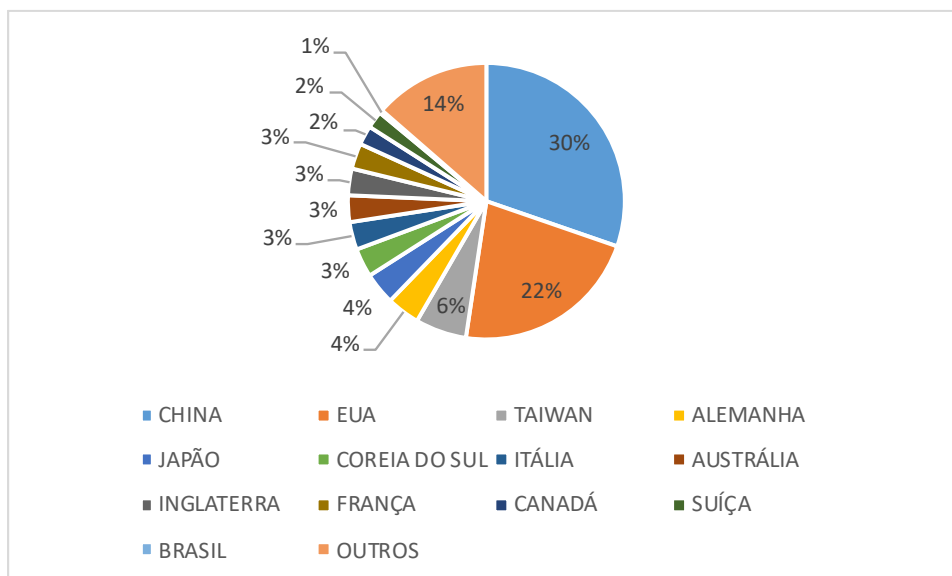


Fonte: Elaborado pelo autor com base no *software VOSviewer* (2026).

As regiões mais amareladas indicam maior quantidade de citações do autor, enquanto que as regiões com maior tendência para o azul indicam menores citações. Complementarmente, a similaridade entre as pesquisas é dada pela densidade: quanto maior a aglomeração entre as citações, mais semelhantes são as suas pesquisas.

Para o termo “*transient control*”, foi possível a construção da Figura 3, que apresenta a distribuição percentual das publicações mundiais acerca do tema, destacando a contribuição relativa de cada país. Nota-se maior quantidade de publicações em alguns países, em especial China e Estados Unidos, que concentram, respectivamente, 30% e 22% do total de trabalhos.

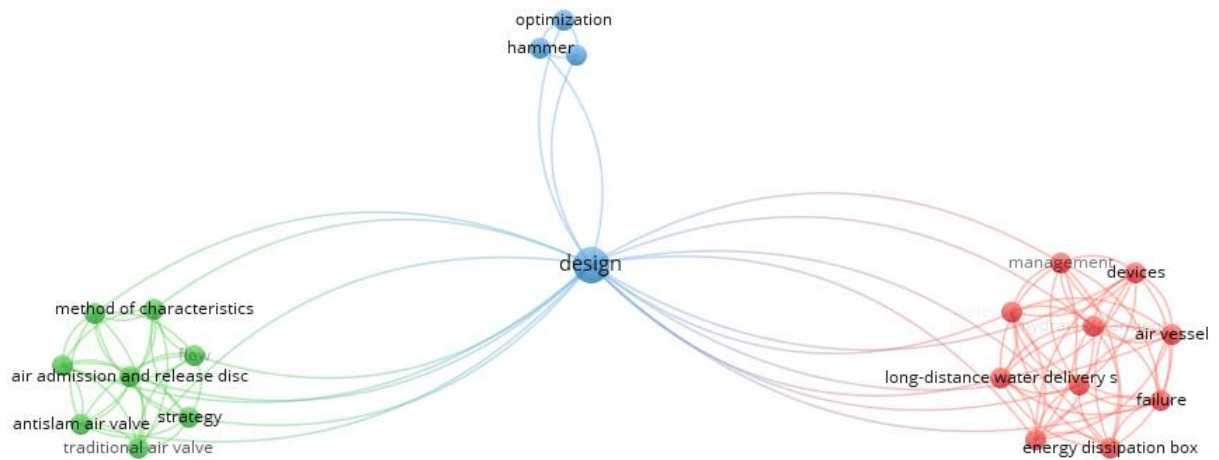
Figura 3 – Gráfico de publicações por país com o termo “*transient control*” com os dados da plataforma *Web of Science*



Fonte: Elaborado pelo autor com base no banco de dados da plataforma *Web of Science* (2026).

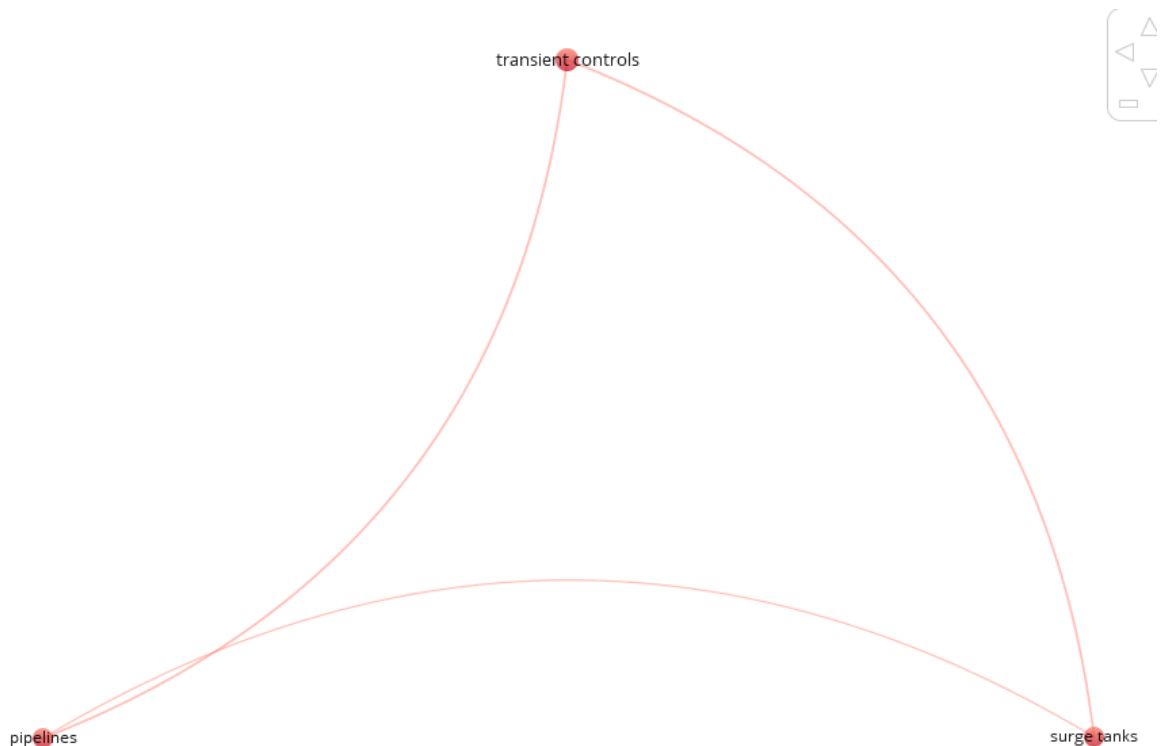
Em seguida, foram analisadas as palavras-chave mais recorrentes relacionadas ao tema “*transient control*”. Para isso, foi utilizado o *software VOSviewer* na sua função de criação de mapas de coocorrência de palavras-chave, gerando a Figura 4 abaixo. Quanto maior o número de ligações e de proximidade entre os termos, os trabalhos apresentam maiores similaridades. No centro do mapa, está o termo “*transient control*”, que se conecta a todos os *clusters*.

Figura 5 – Mapa de coocorrência de palavras-chave mais utilizadas pelos autores nos termos “*transient control*” e “*surge tank*” ou “*air valve*” com os dados da plataforma *Web of Science*



Fonte: Elaborado pelo autor no *software VOSviewer* (2026).

Figura 6 – Mapa de coocorrência de palavras-chave mais utilizadas pelos autores nos termos “*transient control*” e “*surge tank*” ou “*air valve*” com os dados da plataforma *Scopus*



Fonte: Elaborado pelo autor no *software VOSviewer* (2026).

Como palavras-chave de destaque, cabe mencionar “*method of characteristics*”, que reflete a utilização desse método para a solução desse tipo de problema. Aparecem as palavras-chave “*optimization*” (otimização) e “*design*” (projeto), que refletem a necessidade de

otimização de dispositivos para a proteção a partir de pré-dimensionamentos bem elaborados para projetos de sistemas hidráulicos. Aparece, também, a palavra-chave “*pipelines*” (adutoras), demonstrando a tendência desse tipo de pesquisa a ser executada em projetos de adutoras.

Por fim, nota-se que a quantidade de trabalhos que trata de controle de transientes em comparação ao total de pesquisas com o tema geral sobre golpe de aríete (“*water hammer*”) é bastante reduzida (1.162 trabalhos em relação aos 7.003 da primeira busca) e, mais ainda, quando há a restrição em se tratando de Chaminés de Equilíbrio (“*surge tanks*”) ou Ventosas (“*air valves*”), a quantidade de trabalhos se torna praticamente inexistente (apenas 11 trabalhos). O resultado dessa análise bibliométrica reflete a importância deste trabalho.

2.1.2. Principais Problemas em Operação de Adutoras e Utilização de Dispositivos de Proteção contra o Golpe de Aríete

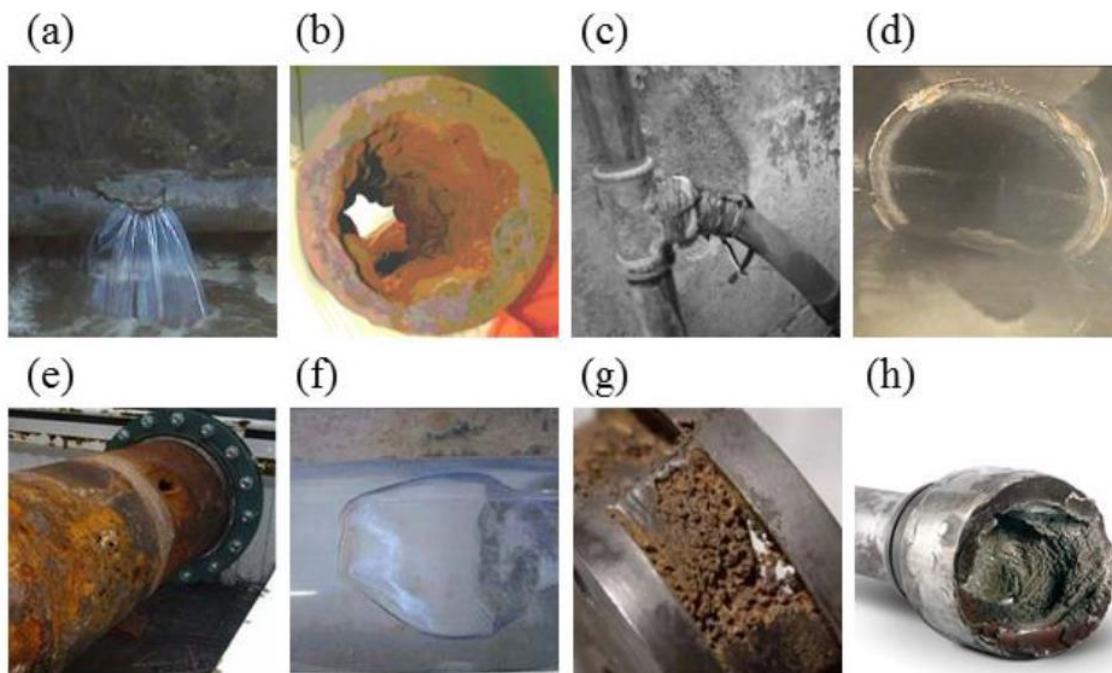
Segundo Sradomski, Nycz e Skowronski (2025), o golpe de aríete é um fenômeno transiente crítico em sistemas de bombeamento, que ocasiona ondas de pressão que percorrem o fluido do sistema e sofrem reflexões em singularidades, como válvulas, reservatórios, tanques ou pontas secas. Dependendo da severidade do transiente, a sobrepressão pode causar falhas na adutora ou danos em equipamentos. Essas ondas podem, ainda, deformar as paredes da tubulação e fadigar o material, principalmente a longo prazo.

Pode-se citar que, conforme destacam Abdulameer *et al.* (2025), as estações elevatórias são componentes críticos de sistemas de distribuição de água, pois são responsáveis por manter a pressão e a vazão suficientes para garantir o abastecimento dos consumidores. Portanto, a confiabilidade operacional e o controle do desempenho nas estações elevatórias determinam a eficiência com a qual as comunidades têm acesso à água. Porém, as estações estão sujeitas a fenômenos hidráulicos complexos que afetam a sua estabilidade operacional, eficiência e longevidade, cabendo destacar o golpe de aríete, particularmente desafiador e que constitui um risco a sistemas hidráulicos mesmo após décadas de pesquisas e avanços tecnológicos.

O abastecimento hídrico é uma necessidade básica para toda e qualquer sociedade, portanto sua segurança e eficiência são fundamentais para a saúde e sobrevivência humana, assim como para o desenvolvimento de suas atividades econômicas. Mesmo com essa importância, uma parcela significativa desses sistemas apresenta várias décadas desde a sua concepção e são afetados por anomalias decorrentes de fenômenos transientes e/ou falhas de manutenção, tais como vazamentos (a), bloqueios parciais (b), conexões deficientes (c),

deformações (d), corrosões (e), biofilme, bolsões de ar (f), cavitação (g) e destacamentos (h) (DUAN *et al.*, 2020), sendo estes problemas visualizados na Figura 7.

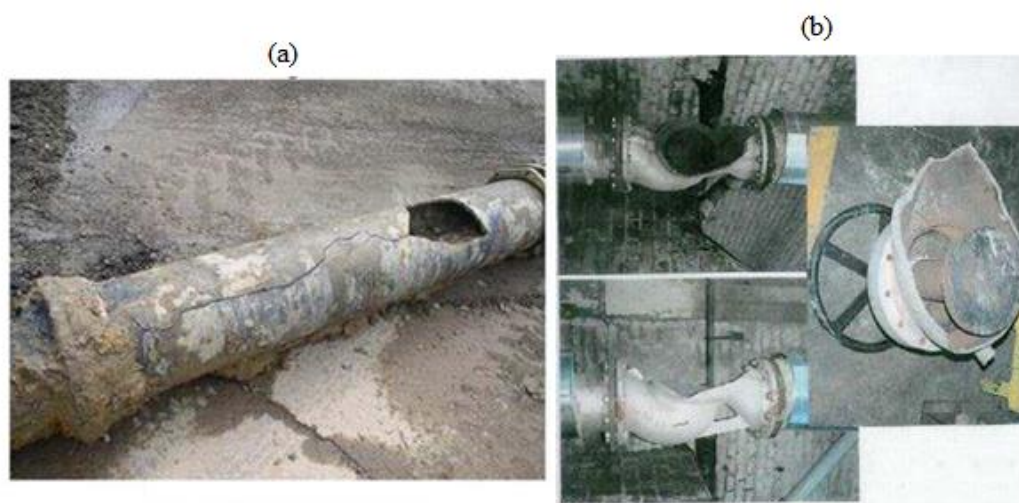
Figura 7 – Anomalias encontradas em tubulações em sistemas urbanos de abastecimento de água



Fonte: Duan *et al.* (2020).

Segundo Mahanna, Loeb e Magalhaes (2014), o golpe de aríete ocorre quando há uma mudança na quantidade de movimento do fluido, gerada por fechamentos bruscos de válvulas ou desligamentos abruptos de bombas. Quando esses fenômenos ocorrem, é possível escutar um alto barulho semelhante ao de um martelo, o que originou o nome em inglês desse tipo de regime de escoamento (“*water hammer*”). O golpe de aríete também provoca vibrações que percorrem toda a adutora. As ondas de pressões geradas podem provocar danos significativos aos sistemas hidráulicos, como rompimento por sobrepressão além da resistência do material (a) e esmagamento da tubulação por subpressão excessiva (b), como pode ser visualizado na Figura 8.

Figura 8 – Danos causados pelo golpe de aríete em tubulações de adutoras



Fonte: Adaptado de Mahanna, Loeb e Magalhaes (2014).

Diante da realidade enfrentada pelos sistemas hidráulicos de abastecimento e a partir do avanço dos estudos e tecnologias, surgiram os dispositivos de proteção contra o golpe de aríete.

De forma geral, o dispositivo utilizado para o controle de ar em adutoras é a Ventosa, cujo funcionamento é regido pela pressão que atua no local onde ela está instalada: caso a tubulação apresente baixa pressão, a Ventosa permite a entrada de ar, prevenindo situações de colapso; caso a pressão se torne excessivamente alta, a Ventosa permite a saída de ar, prevenindo a ocorrência de altas sobrepressões. As duas situações de operação são críticas, sendo a fase de expulsão de ar a que apresenta os maiores riscos. A saída deve ser realizada de forma controlada pois, do contrário, em expulsões rápidas de ar, a coluna de água presente na adutora avança para o local onde a Ventosa está instalada em alta velocidade, o que promove o fechamento abrupto da Ventosa, ocasionando um golpe de aríete que pode ser bastante problemático (CAMPBELL, 1983; FUNK *et al.*, 1992; STEPHENSON, 1997; LEOW; LEE, 1998; ZHOU; HICKS; STEFFLER, 2002; FUERTES *et al.*, 2009; POZOS *et al.*, 2010 apud FUERTES-MIQUEL *et al.*, 2016).

Dadas essas circunstâncias de operação, a instalação das Ventosas nem sempre é garantia de bom desempenho do sistema hidráulico. Por exemplo, seleções inadequadas da Ventosa, medições de desempenho imprecisas ou manutenções inadequadas podem provocar sérios problemas (FUERTES, 2001 apud FUERTES-MIQUEL *et al.*, 2016). Assim, o dimensionamento da Ventosa é muito importante. Caso a Ventosa seja muito pequena, ela não será capaz de expulsar o ar de maneira satisfatória, podendo causar compressão dos bolsões de

ar remanescentes na adutora. Caso a Ventosa seja muito grande, ela pode provocar alta velocidade residual, causando grandes golpes de aríete (FUERTES-MIQUEL, 2016).

A motivação para a instalação de Ventosas nos sistemas hidráulicos reside na admissão de ar em pontos críticos de tal forma a evitar esmagamento das tubulações devido a baixas pressões e na expulsão de ar em situações em que a alta pressão possa promover o colapso das tubulações e/ou conexões do sistema. Embora as Ventosas sejam mecanismos de baixo custo e fácil instalação, a carência de controle de expulsão e admissão de ar em modelos convencionais podem promover os problemas relatados, o que reduz significativamente a confiabilidade do dispositivo, caso ele não tenha sido dimensionado corretamente na fase de projeto. Por fim, as Ventosas são recomendadas para adutoras cuja topografia é propícia para a acumulação de ar em pontos altos.

Por outro lado, dispositivos bastante confiáveis para o controle tanto de sobrepressões como de subpressões são as Chaminés de Equilíbrio. Simplificadamente, as Chaminés de Equilíbrio são reservatórios suplementares adjacentes a um sistema hidráulico sujeito a variações de vazão. Elas são adotadas de tal forma a proteger o sistema das ondas de pressão geradas pelo rápido decréscimo de vazão. As Chaminés têm sido utilizadas ao longo de vários anos, porém ainda são tópicos de pesquisa e melhorias (MAHANNA; LOEB; MAGALHAES, 2014). Até mesmo análises simples de comportamento das Chaminés são desafiadoras, devido à não-linearidade do fator de atrito na equação diferencial do sistema (MOGHADDAM, 2003 apud MAHANNA; LOEB; MAGALHAES, 2014). Ademais, as Chaminés são reservatórios onde a água armazenada tem contato direto com a atmosfera, o que requer cuidados com a contaminação, porém são dispositivos com elevada eficácia na proteção contra o golpe de aríete (CARVALHO, 2020).

Apesar da alta confiabilidade e eficácia das Chaminés de Equilíbrio frente ao golpe de aríete, dificilmente elas são adotadas em sistemas elevatórios em que a linha piezométrica do escoamento do regime permanente seja tão baixa a ponto de justificar a sua utilização (STEPHENSON, 1989 apud MENDES, 2011). Além disso, a principal desvantagem das Chaminés é o seu alto custo de instalação, por se tratar de reservatórios com grandes dimensões. Conforme buscas realizadas, pode-se citar o Projeto Executivo da Adutora de Antonina do Norte/CE, que traz um valor estimativo de R\$ 78.500,00 para a Chaminé de Equilíbrio dimensionada na fase de Anteprojeto desta adutora. Também pode ser citado o trabalho de Carvalho (2020), que elaborou o orçamento de uma Chaminé de Equilíbrio com 30 metros de altura e obteve um valor de R\$ 111.644,93. As Chaminés são utilizadas principalmente em sistemas de alimentação de turbinas e instalações hidroelétricas, porém também podem ser

adotadas em sistemas elevatórios cujas características topográficas sejam favoráveis (CARVALHO, 2020).

As Chaminés de Equilíbrio são indicadas para sistemas hidráulicos de grande porte, uma vez que podem exigir grandes elevações e diâmetros durante a operação. Essa condição limita a sua aplicabilidade, pois traz custos bastante elevados e necessidade de grande área disponível para a sua instalação, podendo ocasionar, inclusive, problemas de desapropriação.

Outro dispositivo que pode ser citado é o Reservatório Hidropneumático, que consiste em um tanque pressurizado que combina a ação de ar comprimido e água de tal forma a manter a pressão e amortecer os transientes. O Reservatório Hidropneumático consegue atenuar tanto sobrepressões como subpressões, porém tem como desvantagem o fato de necessitar de sistemas auxiliares para manutenção de sua pressurização, pois somente consegue atuar caso seja pressurizado, o que depende de instalação elétrica no local onde ele está implantado. Em termos de custos, em consulta realizada a sites de fabricantes, encontrou-se o valor de R\$ 40.675,48 para um Reservatório Hidropneumático de 2000 litros, segundo Meu Compressor (2026). Além disso, no trabalho de Carvalho (2020), foi desenvolvido o orçamento para a implantação de um Reservatório Hidropneumático de 500 litros, obtendo-se um custo de R\$ 102.283,82.

Por fim, pode-se citar como dispositivo de proteção para comparação com os demais o Tanque de Alimentação Unidirecional, que é um reservatório de baixa altura, aberto para a atmosfera e dotado de uma válvula de retenção, cuja operação é bem semelhante à da Chaminé, porém ele só permite o fluxo de água em uma direção, do reservatório para a adutora (AZEVEDO NETTO, 2015). Os Tanques de Alimentação Unidirecional usualmente são empregados para atenuar subpressões nas adutoras. Segundo Carvalho (2020), um Tanque de Alimentação Unidirecional de 10 metros de altura pode representar um custo de R\$ 61.112,94 para a sua implantação. O Tanque de Alimentação Unidirecional citado no Anteprojeto da Adutora de Antonina do Norte/CE apresentou um orçamento estimativo de R\$ 53.240,00.

Assim, o TAEB foi concebido de tal forma a contemplar as vantagens da Ventosa, ou seja, o controle do ar nas adutoras, porém evitando os problemas citados de expulsão ou admissão excessiva de ar, suavizando esses problemas que uma Ventosa simples não consegue evitar. Além disso, ele também atua de maneira semelhante a uma Chaminé de Equilíbrio, mas com dimensões bem reduzidas, o que reduz consideravelmente os custos com instalação. De maneira comparativa, o TAEB da Adutora da Fazenda Santa Maria, utilizado para a validação do modelo numérico deste trabalho, foi construído com um orçamento de R\$ 9.000,00, o que representa um custo bastante reduzido quando comparado com os demais dispositivos citados.

O TAEB também possui a vantagem de ser um dispositivo que funciona sem a necessidade de recarga de ar, como o Reservatório Hidropneumático.

De tal forma a ilustrar um resumo comparativo entre as soluções convencionais de proteção contra o golpe de aríete e o TAEB, elaborou-se a Tabela 1, que traz as características de cada dispositivo.

Tabela 1 – Comparação entre as soluções convencionais para proteção contra transientes e TAEB

Dispositivo	Operação	Limitação técnica e/ou operacional	Impacto econômico	Aplicação
Ventosa convencional	Admissão e expulsão de ar sem controle interno	Risco de grandes admissões e/ou expulsões de ar, gerando separação de coluna e/ou golpes secundários	Baixo	Sistemas com baixa velocidade
Chaminé de Equilíbrio	Oscilação de massa de água nos dois sentidos (do reservatório para a adutora e vice-versa)	Necessidade de grandes dimensões para funcionar adequadamente	Altíssimo	Sistemas de grande porte
Reservatório Hidropneumático	Controle de pressões a partir da interação água/ar	Exigência de manutenção e possibilidade de perda de carga de ar	Altíssimo	Sistemas de grande porte
Tanque de Alimentação Unidirecional	Oscilação de massa de água apenas do reservatório para a adutora	Não atenua sobrepressões diretamente e depende do funcionamento adequado da válvula de retenção instalada	Alto	Sistemas de pequeno e médio porte
Tubo de Admissão e Expulsão Bidirecional	Admissão e expulsão de ar de forma controlada e oscilação de água/ar	Dispositivo modelado apenas no Sistema UFC, o que pode reduzir a sua aplicabilidade	Baixo	Sistemas de pequeno e médio porte com limitações orçamentárias

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Em relação aos softwares disponíveis no mercado para a análise do transitório hidráulico, podem-se citar, principalmente, o Bentley Hammer, o Allievi e o UFC 7, que

apresentam vantagens e desvantagens em suas aplicações. Na Tabela 2, encontra-se um resumo acerca das características de cada um dos softwares citados.

Tabela 2 – Comparação entre os softwares Hammer, Allievi e UFC 7

Software	Desenvolvedor	Vantagens	Desvantagens
Hammer	Bentley Systems	- Confiabilidade nos resultados - Possui grande biblioteca de dispositivos disponíveis - Interface amigável com o usuário	- Não gratuidade de utilização - Software de código fechado - Rigidez na modelagem de novos dispositivos
Allievi	Universidade Politécnica de Valência	- Gratuidade de utilização - Consegue simular o MOC e o MOC considerando efeitos de cavitação	- Possui interface menos amigável que os outros dois softwares - Software de código fechado - Possui dificuldade de entrada de dados
UFC 7	Laboratório de Hidráulica Computacional da UFC	- Software de código aberto, utilizado para fins acadêmicos - Confiabilidade nos resultados - Possui grande biblioteca de dispositivos disponíveis que são constantemente atualizados - Possui facilidade de entrada de dados	- Possui interface mais simplificada

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Dessa forma, embora os softwares Hammer e Allievi sejam bastante utilizados em projetos e/ou trabalhos científicos, o presente trabalho foi desenvolvido utilizando o UFC 7, pelo fato de ser ter sido adotado em diversas pesquisas desenvolvidas ao longo dos anos pelo Laboratório de Hidráulica Computacional (LAHC) da Universidade Federal do Ceará (UFC), devido à sua robustez na implementação do MOC, que foi aperfeiçoada à medida que as pesquisas avançaram, e a possibilidade de implementar novas condições de contorno como o TAEB, pela sua característica de possuir código fonte aberto.

2.2. Método das Características

Segundo Paiva (2023), o estudo sobre o fenômeno do transitório hidráulico é datado de mais 100 anos, tendo seu início entre o final do século XIX e início do século XX, a partir dos estudos de Michaud (1878), Joukowski (1900) e Allievi (1902). A base de partida para a

compreensão do fenômeno considera que a carga máxima em uma tubulação pode ser obtida pela Equação de Joukowski, representada na Equação (1):

$$H = \frac{a \cdot V}{g} \quad (1)$$

Sendo H a carga máxima admissível [L]; a a celeridade da onda [$L \ T^{-1}$]; V a velocidade média do fluido na seção transversal do tubo [$L \ T^{-1}$] e g a aceleração da gravidade [$L \ T^{-2}$].

Segundo Bergant *et al.* (2006), em 1932, Schnyder desenvolveu um método gráfico para solucionar as equações do regime transiente e, em meados de 1960, ele foi substituído por modelagens mais complexas, como o Método das Características. Para Wylie *et al.* (1993), com o advento dos computadores, foi possível a implementação desses modelos, em que termos antes desconsiderados, como o fator de atrito e a compressibilidade do fluido, agora puderam ser incorporados na modelagem, tornando-a mais próxima da realidade.

A partir disso, o MOC vem sendo o mais utilizado até os dias de hoje para a resolução de transientes hidráulicos em fluxo unidimensional (PAIVA, 2023). Assim, para o cálculo e caracterização do comportamento das adutoras durante o fenômeno, o MOC se baseia no conceito de derivada total no cálculo diferencial. As equações governantes do fenômeno formam uma equação parcial linear de 2ª ordem Quasi-Hiperbólica (TEIXEIRA, 2021). Utilizando-se o método das diferenças finitas, essas equações são transformadas em homogêneas, trabalhando-se apenas com uma variável independente. A consistência da estrutura do modelo numérico do MOC e sua possibilidade de implementação computacional permite ampliar o nível de análise técnica por meio de modelos mais robustos.

No contexto da modelagem dos transientes hidráulicos, há duas modelagens numéricas computacionais: o da coluna rígida, utilizado para a investigação de transitórios lentos com baixa frequência; e o da coluna elástica, adotado para a investigação do golpe de aríete, ou seja, transitórios rápidos com alta frequência (FUERTES-MIQUEL *et al.*, 2019a, 2019b).

Neste trabalho, o enfoque será dado ao modelo da coluna elástica e, para isso, serão utilizadas duas equações diferenciais: a equação do momento e a equação da continuidade, solucionadas para fluxo unidimensional, com a consideração de que a parede do conduto e o fluido são linearmente elásticos.

Assim, o MOC trabalha com a solução numérica dessas duas equações, por apresentarem implementação computacional bastante eficiente (WYLIE *et al.*, 1993). Esta solução pode ser visualizada nas Equações (2) e (3):

$$\text{Equação do Momento: } L_1 = g \cdot \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} + J_q + J_u = 0 \quad (2)$$

$$\text{Equação da Continuidade: } L_2 = g \cdot \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{A} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

Sendo J_q o termo do atrito permanente [$L \cdot T^{-2}$]; J_u o termo do atrito variável [$L \cdot T^{-2}$]; A a área da seção transversal do tubo [L^2]; Q a vazão média do fluido na seção transversal do tubo [$L^3 \cdot T^{-1}$]; a a celeridade da onda [$L \cdot T^{-1}$] e g a aceleração da gravidade [$L \cdot T^{-2}$].

A celeridade para um conduto de pequena espessura dotado de juntas de dilatação pode ser calculada pela Equação (4):

$$a = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + [(K/E) \cdot (D/e)]}} \quad (4)$$

Sendo K o módulo de elasticidade volumétrica do fluido [$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$]; ρ a massa específica do fluido [$M \cdot L^{-3}$]; D o diâmetro do conduto [L] e e a espessura das paredes do conduto [L].

Realizando-se uma combinação linear das duas equações e com o auxílio de um multiplicador desconhecido λ , têm-se as Equações (5) e (6):

$$L = L_1 + \lambda \cdot L_2 \quad (5)$$

$$J = J_q + J_u \quad (6)$$

Sendo L , L_1 e L_2 operadores lineares do MOC; λ um multiplicador da combinação linear do MOC e J o termo do atrito [$L \cdot T^{-2}$]. Efetuando-se a combinação linear e substituindo-se as equações, tem-se a Equação (7):

$$g \cdot \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} + J + \lambda \cdot \left(g \cdot \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{A} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} \right) = 0 \quad (7)$$

Pode-se multiplicar a Equação (7) pela área A , podendo-se isolar λ e agrupar as variáveis H e Q , originando a Equação (8):

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial t} + \lambda \cdot a^2 \cdot \frac{\partial Q}{\partial x}\right) + \lambda \cdot g \cdot A \cdot \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\partial H}{\partial x}\right) + J \cdot A = 0 \quad (8)$$

Ambas as variáveis H e Q dependem de x e t . Pode-se, então, enquadrar a variável x como função de t , implicando que o comprimento pode variar infinitesimalmente em função do tempo. Para Chaudhry (2014), se $H = H(x, t)$ e $Q = Q(x, t)$, têm-se as Equações (9) e (10):

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{dx}{dt} \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \quad (9)$$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{dx}{dt} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (10)$$

Analisando as Equações (8), (9) e (10), podem-se obter as Equações (11) e (12):

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{\lambda} = \lambda a^2 \quad (11)$$

$$\lambda = \pm \frac{1}{a} \quad (12)$$

Assim, a Equação (8) se torna uma Equação Diferencial Ordinária (EDO) ao substituir as Equações (9) e (10), obtendo-se a Equação (13):

$$\frac{dQ}{dt} \pm \frac{gA}{a} \cdot \frac{dH}{dt} + J \cdot A = 0 \quad (13)$$

Para Wood *et al.* (2005, apud Paiva, 2023), a Equação (13) representa o movimento da onda de pressão, sendo que o sinal positivo ou negativo indica a sua direção de propagação. Convencionou-se que o sinal positivo de λ indica a movimentação da esquerda para a direita na modelagem de adutora e o sentido horário para a modelagem de redes. No modelo do MOC, então, alternando os sinais positivo e negativo a partir da Equação (13), surgem as duas equações de compatibilidade denominadas C^+ e C^- , que são válidas para as condições dadas pelas Equações (14) e (15):

$$C^+: \frac{dQ}{dt} + \frac{g \cdot A}{a} \cdot \frac{\partial H}{\partial t} + J \cdot A = 0 \rightarrow \text{para } \frac{dx}{dt} = +a \quad (14)$$

$$C^-: \frac{dQ}{dt} - \frac{g \cdot A}{a} \cdot \frac{\partial H}{\partial t} + J \cdot A = 0 \rightarrow \text{para } \frac{dx}{dt} = -a \quad (15)$$

Ao desenvolver a transformação linear, as Equações Diferenciais Parciais (EDP's) são convertidas em Equações Diferenciais Ordinárias (EDO's) que podem representar as linhas características do modelo dadas pela Equação (16):

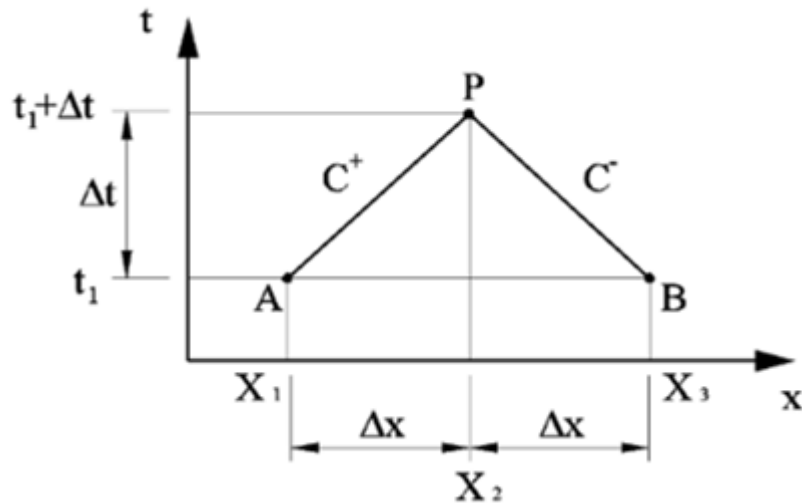
$$\pm dH + \frac{a}{g \cdot A} dQ + \frac{a}{g} \cdot J \cdot dt = 0 \quad (16)$$

Definindo-se o parâmetro B pela Equação (17):

$$B = \frac{a}{g \cdot A} \quad (17)$$

As linhas características do MOC podem ser visualizadas na Figura 9.

Figura 9 – Linhas características do MOC no plano $x - t$



Fonte: Chaudhry (2014).

A Figura 9 acima representa duas linhas características com declividade a e $-a$. Pela interpretação da Figura, nota-se a possibilidade de obtenção de cota piezométrica e vazão em P em um dado instante $t + \Delta t$ a partir de A e B em um instante t .

A Equação (16) pode ser resolvida para a linha característica positiva AP , que pode ser reescrita pela Equação (18):

$$+dH + \frac{a}{g \cdot A} \cdot dQ + \frac{a}{g} \cdot J \cdot dt = 0 \quad (18)$$

Resolvendo a equação característica positiva (C^+), integrando-se a equação anterior entre os pontos A e P e considerando uma aproximação para o termo de atrito J , obtém-se a Equação (19):

$$(H_P - H_A) + B \cdot (Q_P - Q_A) + \frac{a}{g} \cdot J \cdot \Delta t = 0 \quad (19)$$

Sendo H_P a cota piezométrica na seção atual no passo de tempo atual [L]; H_A a cota piezométrica na seção anterior no passo de tempo anterior [L]; Q_P a vazão na seção atual no passo de tempo atual [$L^3 T^{-1}$]; Q_A a vazão na seção anterior no passo de tempo anterior [$L^3 T^{-1}$] e Δt o passo de tempo do modelo [T].

Pode-se reescrever a Equação (19) em função da variável C_{PW} , obtendo-se a Equação (20):

$$H_P = C_{PW} - B \cdot Q_P \quad (20)$$

Pode-se, então, definir o termo C_{PW} a partir das grandezas conhecidas no ponto A , gerando a Equação (21):

$$C_{PW} = H_A + B \cdot Q_A - \frac{a}{g} \cdot J_A \cdot \Delta t \quad (21)$$

Em seguida, pode-se resolver a equação característica negativa (C^-), integrando-se a Equação (19) entre os pontos B e P e considerando uma aproximação para o termo de atrito J , permitindo a elaboração da Equação (22):

$$-(H_P - H_B) + B \cdot (Q_P - Q_B) + \frac{a}{g} \cdot J \cdot \Delta t = 0 \quad (22)$$

Sendo H_B a cota piezométrica na seção posterior no passo de tempo anterior [L] e Q_B a vazão na seção posterior no passo de tempo anterior [$L^3 T^{-1}$].

Pode-se reescrever a Equação (22) em função da variável C_M e construir as Equações (23) e (24):

$$H_P = C_M + B \cdot Q_P \quad (23)$$

$$C_M = H_B - B \cdot Q_B + \frac{a}{g} \cdot J_B \cdot \Delta t \quad (24)$$

Por fim, pode-se calcular a vazão isolando-se qualquer uma das Equações (20) e (23), isolando-se a variável Q_P , o que permite calcular a vazão a cada passo de tempo conhecendo-se a carga piezométrica. Optando-se por isolar a Equação (23), tem-se a Equação (25):

$$Q_P = \frac{H_P - C_M}{B} \quad (25)$$

Assim, segundo Teixeira (2021), o MOC apresenta uma solução que resulta em equações que permitem determinar a vazão e a pressão em dado passo de tempo dependendo dessas variáveis no intervalo de tempo anterior e nas seções anteriores e posteriores. Entretanto, para elementos como reservatórios, válvulas, bombas, dispositivos atenuadores de golpe de aríete ou discontinuidades (por exemplo, junções de tubulações de diferentes diâmetros ou ramificações de vários tubos), faz-se necessária a adoção de condições de contorno que representam o seu comportamento físico.

Por fim, o MOC apresenta as seguintes limitações em sua aplicabilidade:

1. O modelo se torna instável caso não obedeça ao critério de estabilidade de Courant, dado pela Equação (26):

$$C_n = a \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (26)$$

Onde C_n é o número de Courant [-]; a é a celeridade [$L T^{-1}$]; Δt é o passo de tempo [T] e Δx é o comprimento das seções da tubulação [L] ($\Delta x = L/N_C$, sendo L o comprimento total da tubulação [L] e N_C o número de seções de cálculo).

2. Nas situações de transiente muito rápido, o MOC pode subestimar as pressões;
3. Sistemas hidráulicos com geometrias muito complexas (por exemplo, com muitas válvulas, bombas ou singularidades) podem tornar a estabilidade do modelo difícil de ser atingida;
4. O MOC não é adequado para a simulação de escoamentos bifásicos (por exemplo, escoamentos com interação ar/água) em que a mistura de fases altera a celeridade da onda. Porém, pesquisas mais recentes desenvolveram modelos baseados no MOC incorporando a consideração de mistura de fases no escoamento.

Para as simulações presentes neste trabalho, foi necessário adotar as condições de contorno de reservatório a jusante, bomba centrífuga a montante e junção de dois trechos, cujos modelos estão detalhados nos tópicos seguintes.

2.2.1. Reservatório com Nível Constante a Jusante

Neste trabalho, a condição de contorno do reservatório com nível constante a jusante foi adotada conforme as formulações propostas por Chaudhry (2014), que partem do pressuposto de que a carga do reservatório se mantém constante durante todo o evento transitório, o que é bastante razoável para reservatórios de grandes dimensões e eventos transitórios de curta duração. Desprezando as perdas de carga presentes na entrada do reservatório, obtém-se a Equação (27):

$$H_{P_{i,n+1}} = H_{res} \quad (27)$$

Onde o subscrito i representa determinado tubo i e $n + 1$ representa a seção ao fim da tubulação, considerando que o tubo i foi dividido em n trechos.

Como o reservatório se encontra no último trecho da tubulação, para determinar a vazão a cada passo de tempo, deve-se adotar a equação característica positiva combinadamente com a pressão nesse ponto e a vazão e a pressão de um passo de tempo anterior, resultando na Equação (28):

$$Q_{P_{i,n+1}} = C_{P_i} - C_{a_i} \cdot H_{res} \quad (28)$$

Sendo C_{P_i} e C_{a_i} os coeficientes do modelo de Chaudhry (2014) calculados pelas Equações (29) e (30):

$$C_{P_i} = Q_A + C_{a_i} \cdot H_A - \frac{f}{2 \cdot D \cdot A} \cdot \Delta t \cdot Q_A \cdot |Q_A| \quad (29)$$

$$C_{a_i} = \frac{g \cdot A}{a} \quad (30)$$

Sendo f o fator de atrito [-].

A principal limitação do modelo é que ele considera a tubulação com entrada pela parte inferior do reservatório, quando o fluxo encontra a coluna líquida que consegue sustentar a carga. Entretanto, caso a tubulação entre pela parte superior do reservatório, o fluxo encontra a pressão atmosférica e não é razoável considerar a carga constante durante o evento transitório. Assim, nesse contexto, cabe destacar que o trabalho de Teixeira (2021) aborda com detalhes a modelagem computacional da situação com a entrada superior em reservatórios de jusante durante o transitório hidráulico.

2.2.2. Bomba Centrífuga a Montante

A condição de contorno da bomba centrífuga a montante adotada neste trabalho é aquela formulada por Chaudhry (2014). O modelo fundamenta-se nas seguintes premissas:

1. Os dados de desempenho da bomba foram obtidos de testes realizados em regime permanente e são válidos para análises transientes;
2. Assume-se que as características de uma bomba protótipo podem ser obtidas por meio de dados de modelos por meio de relações homólogas, em que se pressupõe que as bombas são geometricamente semelhantes e que os padrões de fluxo que passam por elas são similares;
3. O modelo assume a aplicabilidade do MOC para resolver as equações diferenciais que regem o regime transiente nas tubulações.

Para desenvolver a condição de contorno para a bomba, necessita-se conhecer a relação existente entre a vazão e a carga. A vazão (Q) de uma bomba centrífuga é função da velocidade de rotação (N) e da carga de bombeamento (H), enquanto que a velocidade no estado transiente depende do torque (T), sendo essas quatro variáveis necessárias para determinar matematicamente a bomba e são disponibilizadas através das curvas características da bomba.

Nos pontos de melhor eficiência, os valores de Q , N , H e T encontram-se nas condições nominais e recebem, portanto, o subscrito R (STEPANOFF, 1957, apud CHAUDHRY, 2014). Utilizando esses valores de referência, definem-se quatro variáveis adimensionais expostas nas Equações (31), (32), (33) e (34):

$$v = \frac{Q}{Q_R} \quad (31)$$

$$h = \frac{H}{H_R} \quad (32)$$

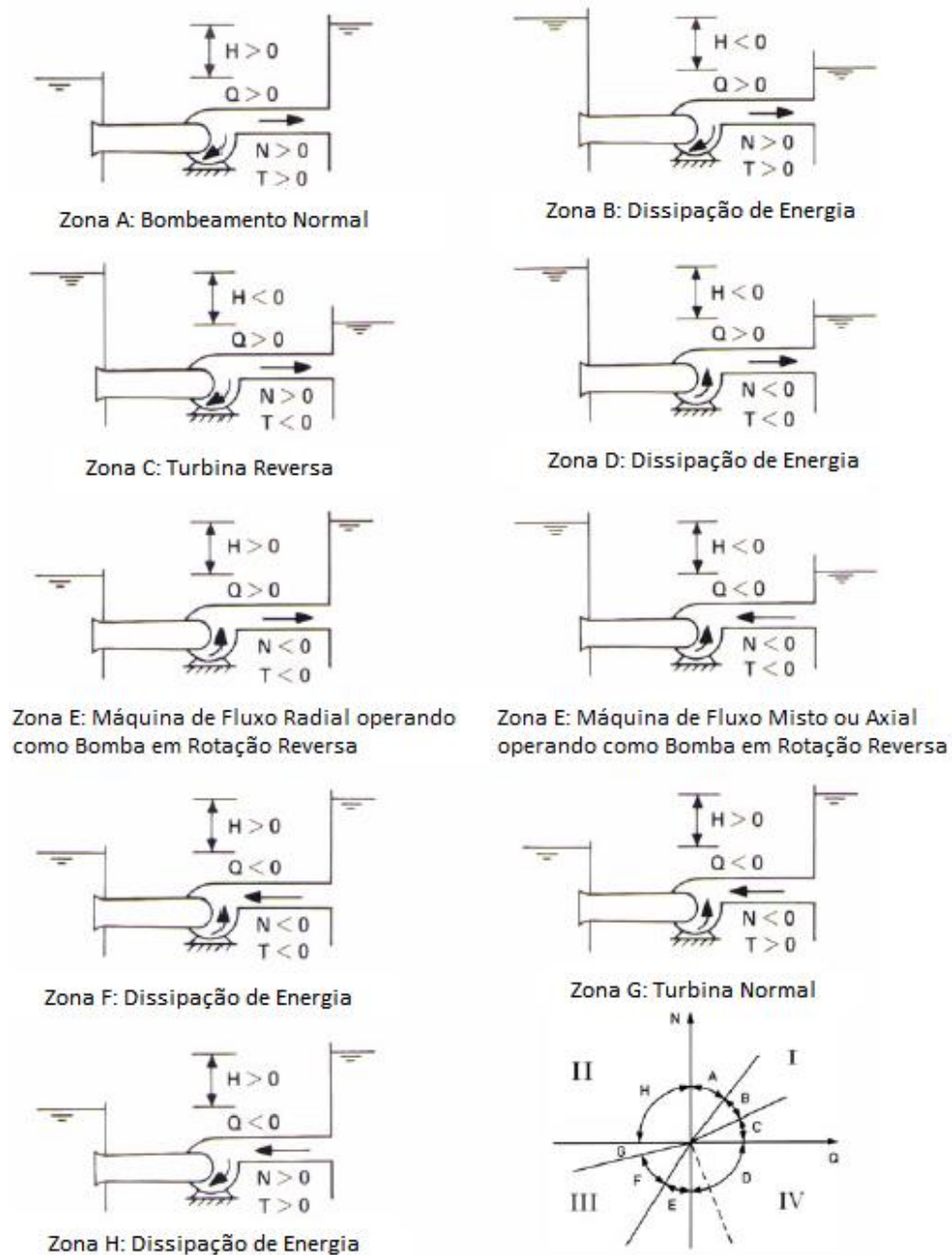
$$\alpha = \frac{N}{N_R} \quad (33)$$

$$\beta = \frac{T}{T_R} \quad (34)$$

Durante a operação no estado permanente, os sinais de v , h , α e β são positivos. Entretanto, durante o evento transiente, esses sinais podem se tornar negativos individualmente ou em grupo, sendo denominadas condições anormais de funcionamento.

O funcionamento da bomba depende dos sinais dessas quatro variáveis adimensionais e é dividido em quatro quadrantes e oito zonas de operação, sendo estes descritos por Martin (1983) e representados na Figura 10.

Figura 10 – Zonas e quadrantes de operação da bomba centrífuga segundo Martin (1983)



Chaudhry (2014) utiliza o conceito de bombas homólogas, ou seja, geometricamente semelhantes e com modelo de vazões semelhante, encontrando as relações das Equações (35) e (36):

$$\frac{h}{\alpha^2 + v^2} = \text{Constante} \quad (35)$$

$$\frac{\alpha}{v} = \text{Constante} \quad (36)$$

Para evitar erros numéricos da Equação (36), define-se a Equação (37):

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\alpha}{v} \quad (37)$$

De maneira análoga, a curva característica de torque pode ser determinada com o conceito de bombas homólogas, resultado da relação entre $\beta/(\alpha^2 + v^2)$ e θ .

Considerando que o cálculo do transiente se procede até o i -ésimo passo de tempo, os valores de v , h , α e β são conhecidos no início do passo de tempo e necessita-se calcular v_p , h_p , α_p e β_p , que seriam os valores ao final do passo de tempo. Para primeira estimativa, pode-se utilizar uma extrapolação de valores conhecidos a partir do passo de tempo anterior, resultando nas Equações (38) e (39):

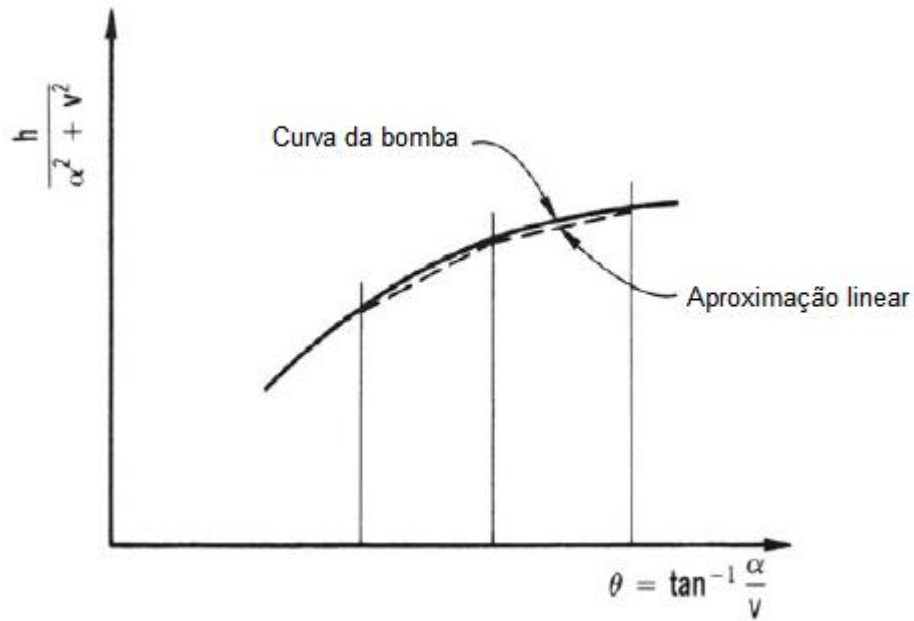
$$\alpha_e = \alpha_i + \Delta\alpha_{i-1} \quad (38)$$

$$v_e = v_i + \Delta v_{i-1} \quad (39)$$

Onde α_e e v_e indicam o valor das variáveis ao final do passo de tempo [-]; α_i e v_i indicam o valor das variáveis no início do passo de tempo [-] e $\Delta\alpha_{i-1}$ e Δv_{i-1} representam a variação dessas variáveis durante o passo de tempo analisado [-].

Dispondo em um gráfico $\theta = \tan^{-1}(\alpha/v)$ no eixo das abscissas e $h/(\alpha^2 + v^2)$ no eixo das ordenadas, procede-se com a aproximação linear da curva obtida, conforme pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 – Aproximação considerada para a curva característica da bomba



Fonte: Adaptado de Chaudhry (2014).

Considerando que v_P , h_P , α_P e β_P pertencem à linha reta aproximada, pode-se escrever uma relação linear introduzindo as variáveis a_1 , a_2 , a_3 e a_4 , que são parâmetros das retas representadas pelas Equações (40) e (41):

$$\frac{h_P}{\alpha_P^2 + v_P^2} = a_1 + a_2 \cdot \tan^{-1} \frac{\alpha_P}{v_P} \quad (40)$$

$$\frac{\beta_P}{\alpha_P^2 + v_P^2} = a_3 + a_4 \cdot \tan^{-1} \frac{\alpha_P}{v_P} \quad (41)$$

A Equação (42) a seguir se refere à carga total da bomba na seção $(i, 1)$:

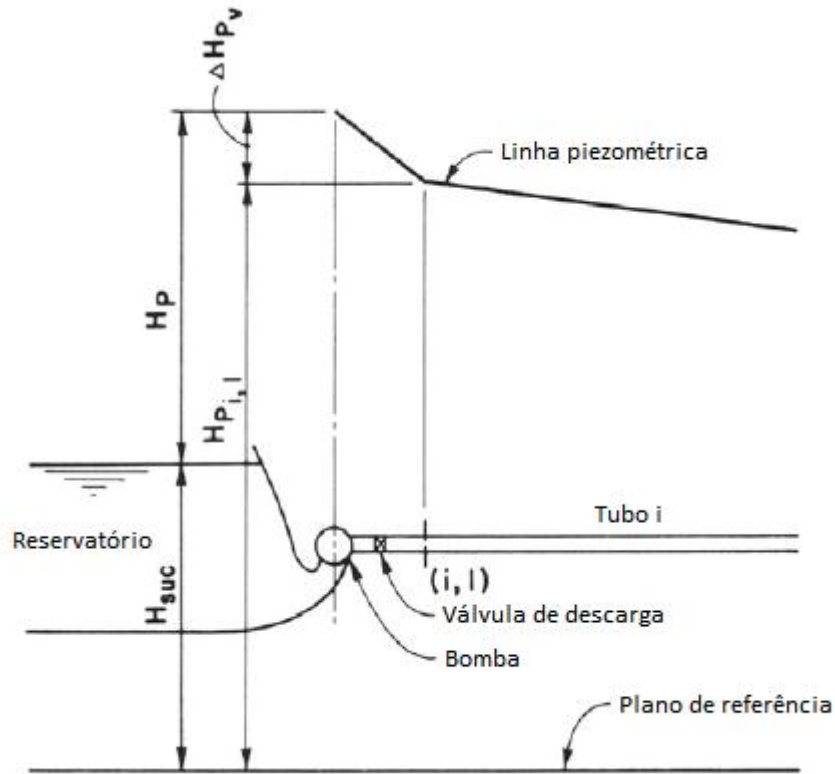
$$H_{P_{i,1}} = H_{suc} + H_P - \Delta H_{P_v} \quad (42)$$

Onde H_{suc} é a altura da superfície líquida no reservatório de sucção a partir de um nível de referência [L]; H_P é a carga de bombeamento ao final do passo de tempo [L] e ΔH_{P_v} é a perda de carga na válvula de descarga ao fim do passo de tempo [L], sendo seu valor calculado a partir da Equação (43):

$$\Delta H_{P_v} = C_v \cdot Q_{P_{i,1}}^2 = C_v \cdot Q_{P_{i,1}} \cdot |Q_{P_{i,1}}| \quad (43)$$

Onde C_v é o coeficiente de perda de carga na válvula [-]. As variáveis ilustradas acima podem ser visualizadas na Figura 12.

Figura 12 – Condição de contorno da bomba centrífuga a montante



Fonte: Adaptado de Chaudhry (2014).

Para o cálculo do torque, Almeida e Koelle (1992) utilizam a equação diferencial de massas girantes, sendo o produto da aceleração angular pelo momento de inércia polar do sistema. Como não há torque externo no momento de uma falha elétrica, o torque de desaceleração é o torque da bomba. O torque então é calculado pela Equação (44):

$$T = -I \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{dN}{dt} \quad (44)$$

Onde I é o momento de inércia polar combinado de bomba, motor, eixo e fluido que entra no rotor [L^4].

Combinando as Equações (33) e (34) com a Equação (44), resulta-se na Equação (45):

$$\beta = -I \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{N_R}{T_R} \cdot \frac{d\alpha}{dt} \quad (45)$$

Na Equação (45), T_R é dado pela Equação (46):

$$T_R = \frac{60 \cdot \gamma \cdot H_R \cdot Q_R}{2\pi \cdot N_R \cdot \eta_R} \quad (46)$$

Onde η_R é a eficiência da bomba nas condições nominais [-].

Utilizando um valor médio de β no passo de tempo, a Equação (46) pode ser escrita na forma de diferenças finitas como a Equação (47):

$$\frac{\alpha_P - \alpha}{\Delta t} = \frac{60 \cdot T_R}{2\pi \cdot I \cdot N_R} \cdot \frac{\beta + \beta_P}{2} \quad (47)$$

Que, simplificadamente, resulta na Equação (48):

$$\alpha_P - C_6 \cdot \beta_P = \alpha + C_6 \cdot \beta \quad (48)$$

O coeficiente C_6 é dado pela Equação (49):

$$C_6 = \frac{-15 \cdot T_R \cdot \Delta t}{\pi \cdot N_R \cdot I} \quad (49)$$

Segundo Chaudhry (2014), considerando que o comprimento da tubulação de sucção é pequeno, pode-se desprezar seu valor e, portanto, utiliza-se a equação característica negativa para o recalque na seção $(i, 1)$, ou seja, a Equação (50):

$$Q_{P_{i,1}} = C_N + C_a \cdot H_{P_{i,1}} \quad (50)$$

Sendo C_N e C_a os parâmetros de cálculo da equação negativa de Chaudhry (2014) calculados como as Equações (51) e (52):

$$C_N = Q_B - C_a \cdot H_B - \frac{f}{2 \cdot D \cdot A} \cdot \Delta t \cdot Q_B \cdot |Q_B| \quad (51)$$

$$C_a = \frac{g \cdot A}{a} \quad (52)$$

E, para o cálculo da vazão, como não há variação no volume de água armazenado entre a sucção e a seção $(i, 1)$, pela equação da continuidade, tem-se a Equação (53):

$$Q_{P_{i,1}} = Q_P \quad (53)$$

As Equações (40), (41), (42), (43), (48), (50) e (53) descrevem as condições de contorno da bomba. Ao eliminar $H_{P_{i,1}}$, ΔH_{P_v} e $Q_{P_{i,1}}$ das Equações (42), (43), (50) e (53), utilizando Q_R e H_R como valores de referência, obtém-se a Equação (54):

$$Q_R v_P = C_N + C_a \cdot H_{suc} + C_a \cdot H_R \cdot h_P - C_a \cdot C_v \cdot Q_R^2 \cdot v_P \cdot |v_P| \quad (54)$$

Eliminando h_P e β_P das Equações (40) e (41), geram-se as Equações (55) e (56):

$$F_1 = C_a \cdot H_R \cdot a_1 \cdot (\alpha_P^2 + v_P^2) + C_a \cdot H_R \cdot a_2 \cdot (\alpha_P^2 + v_P^2) \cdot \tan^{-1} \frac{\alpha_P}{v_P} - Q_R \cdot v_P - C_a \cdot C_v \cdot Q_R^2 \cdot v_P \cdot |v_P| + C_N + C_a \cdot H_{suc} = 0 \quad (55)$$

$$F_2 = \alpha_P - C_6 \cdot a_3 \cdot (\alpha_P^2 + v_P^2) + C_6 \cdot a_4 \cdot (\alpha_P^2 + v_P^2) \cdot \tan^{-1} \frac{\alpha_P}{v_P} - \alpha - C_6 \cdot \beta = 0 \quad (56)$$

As Equações (55) e (56) são não-lineares e podem ser resolvidas pelo Método de Newton-Raphson. Estima-se, inicialmente, valores para α_P e v_P , atribuindo o sobrescrito (1). A interpolação seguinte pode ser determinada pelas Equações (57) e (58):

$$\alpha_P^{(2)} = \alpha_P^{(1)} + \Delta \alpha_P \quad (57)$$

$$v_P^{(2)} = v_P^{(1)} + \Delta v_P \quad (58)$$

Sendo $\Delta \alpha_P$ e Δv_P dados pelas Equações (59) e (60):

$$\Delta \alpha_P = \frac{F_2 \cdot \frac{\partial F_1}{\partial v_P} - F_1 \cdot \frac{\partial F_2}{\partial v_P}}{\frac{\partial F_1}{\partial \alpha_P} \cdot \frac{\partial F_2}{\partial v_P} - \frac{\partial F_1}{\partial v_P} \cdot \frac{\partial F_2}{\partial \alpha_P}} \quad (59)$$

$$\Delta v_P = \frac{F_2 \cdot \frac{\partial F_1}{\partial \alpha_P} - F_1 \cdot \frac{\partial F_2}{\partial \alpha_P}}{\frac{\partial F_1}{\partial v_P} \cdot \frac{\partial F_2}{\partial \alpha_P} - \frac{\partial F_1}{\partial \alpha_P} \cdot \frac{\partial F_2}{\partial v_P}} \quad (60)$$

Caso $|\Delta \alpha_P|$ e $|\Delta v_P|$ apresentem valores menores que determinada tolerância (0,001 por exemplo), $\alpha_P^{(2)}$ e $v_P^{(2)}$ são soluções das Equações (55) e (56). Caso contrário, devem ser feitas novas interpolações até atingir a tolerância desejada.

A desconsideração do comprimento de sucção, inicialmente proposto no modelo de Chaudhry (2014), foi adotada durante vários anos após a criação do UFC 7, e ainda é possível

realizar o cálculo do transiente nessa situação, por meio da criação do arquivo na extensão .pth e posterior simulação no UFC 7. Entretanto, com o avanço das pesquisas de regime transiente no LAHC da UFC, surgiu a necessidade de considerar o comprimento de sucção, especialmente para permitir realizar a simulação do transiente hidráulico na válvula de retenção. Nessa nova forma de simulação, o sistema realiza a criação do arquivo na extensão .inp e posteriormente esse arquivo pode ser simulado no UFC 7. Na seção 2.5 deste trabalho, há maiores detalhes sobre a utilização dos módulos do Sistema UFC e a criação dos arquivos aqui mencionados.

Com a consideração do comprimento de sucção, também é possível realizar a simulação com bombas em paralelo. Segundo Chaudhry (2014), a vazão na seção de montante à linha de recalque pode ser calculada pela Equação (61):

$$Q_{P_{i,1}} = n_P \cdot Q_P \quad (61)$$

Sendo n_P o número de bombas em paralelo.

A depender do comprimento da linha de sucção do sistema de bombeamento, pode-se dividir a condição de contorno para as bombas em paralelo em dois casos: linha de sucção curta e linha de sucção longa.

No primeiro caso, a linha de sucção pode ser desprezada. Assim, a Equação (61) se torna a Equação (62):

$$n_P \cdot Q_R \cdot v_P = C_N + C_a \cdot H_{suc} + C_a \cdot H_R \cdot h_P - C_a \cdot C_v \cdot Q_R^2 \cdot v_P \cdot |v_P| \quad (62)$$

As Equações (40), (41) e (48) também são válidas para esse caso. Realizando os mesmos procedimentos adotados para a desconsideração da linha de sucção, pode-se adaptar a Equação (55) para considerar a quantidade de bombas em paralelo, obtendo-se a Equação (63):

$$F_1 = C_a \cdot H_R \cdot a_1 \cdot (\alpha_P^2 + v_P^2) + C_a \cdot H_R \cdot a_2 \cdot (\alpha_P^2 + v_P^2) \cdot \tan^{-1} \frac{\alpha_P}{v_P} - n_P \cdot Q_R \cdot v_P - C_a \cdot C_v \cdot Q_R^2 \cdot v_P \cdot |v_P| + C_N + C_a \cdot H_{suc} = 0 \quad (63)$$

De forma análoga, a equação para F_2 pode ser obtida adaptando-se a Equação (56) para a consideração do número de bombas em paralelo. Para bombas idênticas em paralelo, a equação para F_2 pode ser escrita exatamente como a Equação (56).

Já para o caso de linha de sucção longa, não há a possibilidade de desprezar esse termo no modelo. Na análise do transiente, para esse caso, devem-se acrescentar as equações características presentes nas Equações (64), (65), (66) e (67), válidas para a linha de sucção, às Equações (40), (41) e (48), o que permite a obtenção das Equações (64), (65), (66) e (67):

$$H_P = H_{P_{i+1,1}} - H_{P_{i,n+1}} \quad (64)$$

$$Q_{P_{i,n+1}} = C_P - C_{a_i} \cdot H_{P_{i,n+1}} \quad (65)$$

$$Q_{P_{i+1,1}} = C_N - C_{a_{i+1}} \cdot H_{P_{i+1,1}} \quad (66)$$

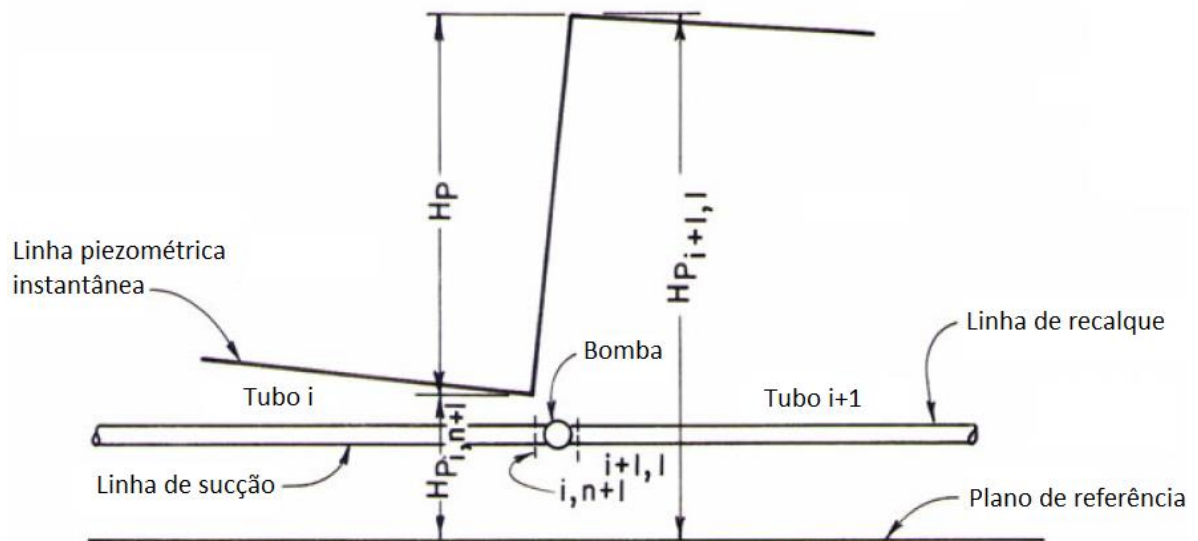
$$Q_{P_{i,n+1}} = Q_{P_{i+1,1}} = n_P \cdot Q_P \quad (67)$$

Onde o subscrito $i + 1$ representa determinado tubo $i + 1$ e 1 representa a seção ao do início da tubulação, considerando que o tubo $i + 1$ foi dividido em n trechos. Na Equação (65) acima, o coeficiente C_P é calculado pela Equação (68):

$$C_P = Q_A + C_{a_i} \cdot H_A - \frac{f}{2 \cdot D \cdot A} \cdot \Delta t \cdot Q_A \cdot |Q_A| \quad (68)$$

As variáveis apresentadas acima podem ser melhor compreendidas observando-se a Figura 13.

Figura 13 – Bomba com linha de sucção longa



Fonte: Adaptado de Chaudhry (2014).

Multiplicando-se a Equações (65) por $C_{a_{i+1}}$, a Equação (66) por C_{a_i} e substituindo os termos $Q_{P_{i,n+1}}$ e $Q_{P_{i+1,1}}$ a partir da Equação (67), e adicionando todas as equações resultantes dessas operações, obtém-se a Equação (69):

$$n_P \cdot Q_P \cdot (C_{a_i} + C_{a_{i+1}}) = C_N \cdot C_{a_i} + C_P \cdot C_{a_{i+1}} + C_{a_i} \cdot C_{a_{i+1}} \cdot H_P \quad (69)$$

Nas condições nominais, adotando-se Q_R e H_R como valores de referência, a Equação (69) pode ser reescrita como a Equação (70):

$$h_P = \frac{n_P \cdot (C_{a_i} + C_{a_{i+1}}) \cdot Q_R \cdot v_P - C_N \cdot C_{a_i} + C_{a_i} \cdot C_{a_{i+1}} \cdot H_P}{C_{a_i} \cdot C_{a_{i+1}} \cdot H_R} \quad (70)$$

Eliminando h_P das Equações (40) e (70), obtém-se a Equação (71):

$$F_1 = a_1 \cdot (\alpha_P^2 + v_P^2) + a_2 \cdot (\alpha_P^2 + v_P^2) \cdot \tan^{-1} \frac{\alpha_P}{v_P} - C_7 \cdot v_P + C_8 = 0 \quad (71)$$

Onde C_7 e C_8 são coeficientes determinados pelas Equações (72) e (73):

$$C_7 = \frac{n_P \cdot (C_{a_i} + C_{a_{i+1}}) \cdot Q_R}{C_{a_i} \cdot C_{a_{i+1}} \cdot H_R} \quad (72)$$

$$C_8 = \frac{C_N \cdot C_{a_i} + C_P \cdot C_{a_{i+1}}}{C_{a_i} \cdot C_{a_{i+1}} \cdot H_R} \quad (73)$$

De forma semelhante, pode-se obter a equação para o termo F_2 adaptando-se a Equação (56) de tal forma a considerar o número de bombas em paralelo.

Por fim, as equações para F_1 e F_2 devem ser resolvidas por meio de interpolações pelo Método de Newton-Raphson, conforme os critérios explicitados nas Equações (57), (58), (59) e (60).

Analisando-se o modelo da bomba centrífuga a montante de Chaudhry (2014), podem-se perceber as seguintes limitações:

1. A utilização de dados de desempenho obtidos em testes realizados em regime permanente para prever o comportamento da bomba no regime transiente é a principal limitação do modelo, pelo fato de haver pouca informação disponível acerca do comportamento dinâmico de bombas, mesmo que a validade desses dados durante o transitório hidráulico não tenha sido demonstrada;
2. A carga cinética, por normalmente ser pequena em comparação com as outras cargas da Equação da Energia, é desprezada no modelo. Caso haja situações em que a carga cinética é elevada, o modelo deve ser ajustado para levá-la em consideração;
3. Na ausência de dados completos para a bomba em estudo, as características de uma bomba com aproximadamente a mesma velocidade específica (dada pela Equação (74)

abaixo) podem ser adotadas como uma aproximação. Entretanto, as características da bomba dependem do tipo de bomba e outras particularidades da fabricação, por exemplo, o rotor, o difusor e a carcaça da bomba.

$$N_S = \frac{\omega_R \cdot \sqrt{Q_R}}{(g \cdot H_R)^{3/4}} \quad (74)$$

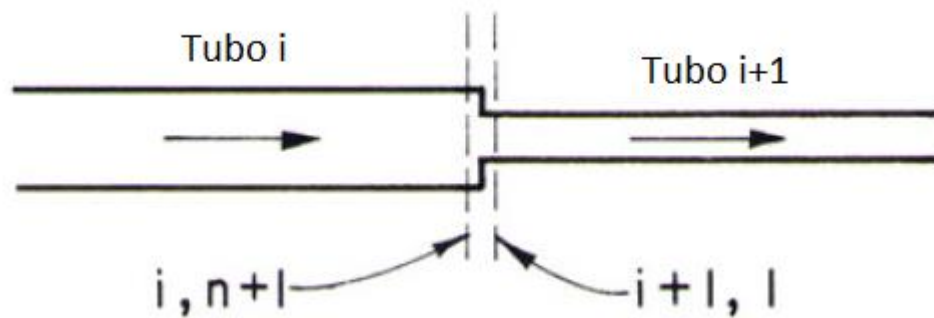
Onde N_S é a velocidade específica da bomba [T^{-1}] e ω_R é a velocidade angular do rotor da bomba nas condições nominais [T^{-1}].

2.2.3. Junção de Dois Trechos

O modelo de junção de dois trechos adotado neste trabalho é aquele desenvolvido por Chaudhry (2014). Essa condição se dá quando há uma mudança de diâmetro, espessura, material e/ou fatores de atrito entre dois trechos distintos de tubulações.

Assumindo a mesma carga de velocidade e desprezando a perda de carga entre as seções $i, n+1$ e $i+1, 1$ da Figura 14 abaixo, obtém-se a Equação (75).

Figura 14 – Junção de dois trechos



Fonte: Adaptado de Chaudhry (2014).

$$H_{P_{i,n+1}} = H_{P_{i+1,1}} \quad (75)$$

Aplicando as equações características positiva e negativa nessas seções, têm-se as Equações (76) e (77):

$$Q_{P_{i,n+1}} = C_{P_i} - C_{a_i} \cdot H_{P_{i,n+1}} \quad (76)$$

$$Q_{P_{i+1,1}} = C_{N_{i+1}} - C_{a_{i+1}} \cdot H_{P_{i+1,1}} \quad (77)$$

Considerando a equação da continuidade na junção, tem-se a Equação (78):

$$Q_{P_{i,n+1}} = Q_{P_{i+1,1}} \quad (78)$$

Desenvolvendo matematicamente as Equações (75), (76), (77) e (78), obtém-se a Equação (79):

$$H_{P_{i,n+1}} = \frac{C_{P_i} - C_{N_{i+1}}}{C_{a_i} + C_{a_{i+1}}} \quad (79)$$

Com o valor de $H_{P_{i,n+1}}$ determinado na Equação (79), pode-se obter $H_{P_{i+1,1}}$, $Q_{P_{i,n+1}}$ e $Q_{P_{i+1,1}}$ pelas Equações (75), (76) e (77).

A principal limitação do modelo de junção de dois trechos é o desprezo de perdas de carga localizadas na junção, o que pode ocasionar perda de precisão em casos com mudanças bruscas entre os dois trechos (por exemplo, uma redução ou uma ampliação súbita de diâmetro), em que pode haver perdas de carga significativas.

2.3. Dispositivos de Proteção contra o Golpe de Aríete

O regime transitório em adutoras ou redes de água, por ter um caráter oscilatório em termos de vazão e pressão, é indesejado pelos responsáveis por esses sistemas hidráulicos, mas é praticamente impossível de não ocorrer durante a sua operação ao longo do tempo. Esse regime pode promover grandes danos às tubulações, conexões e dispositivos, pelo fato de possibilitar a ocorrência de pressões acima ou abaixo das suportadas pela resistência dos materiais dos quais as adutoras ou redes são compostas.

Assim, é de fundamental importância o cálculo do transitório hidráulico por meio de simulações que representam a realidade, para que seja possível, também, propor soluções adequadas para combater os efeitos indesejados desse regime.

Nesse contexto, surgem os dispositivos atenuadores do Golpe de Aríete, cuja utilização depende da velocidade com que o transiente ocorre, da rigidez do material das tubulações, do perfil topográfico do local onde a adutora ou rede está instalada e do tempo de fechamento das válvulas ou desligamento das bombas. Os principais dispositivos adotados para

combater o Golpe de Aríete são: Chaminés de Equilíbrio, Tanques de Alimentação Unidirecional, Reservatórios Hidropneumáticos, Válvulas de Alívio, Ventosas, Válvulas de Retenção e Volantes de Inércia.

2.3.1. Chaminés de Equilíbrio

Segundo Chaudhry (2014), a Chaminé de Equilíbrio consiste em um reservatório aberto para a atmosfera conectada à adutora para o controle do transiente hidráulico. De acordo com a pressão durante o regime transiente presente no local onde ela está instalada, a Chaminé irá fornecer água (para o caso de haver subpressões) ou armazenar o excesso de água (proveniente de sobrepressões na adutora).

Para Barbosa (2006), as Chaminés de Equilíbrio são utilizadas normalmente em adutoras por gravidade, para proteção contra os efeitos de fechamento rápido de válvulas ou variações abruptas de vazão em turbinas ou bombas. Geralmente, as Chaminés de Equilíbrio são posicionadas próximas ao reservatório alimentador da adutora.

A Figura 15 exibe um exemplo de Chaminé de Equilíbrio, localizada na central hidrelétrica do Rio Tigre.

Figura 15 – Chaminé de Equilíbrio presente na Central Hidrelétrica do Rio Tigre



Fonte: Oliveira (2017).

Dentre as vantagens da utilização da Chaminé de Equilíbrio, podem-se citar:

- É um dispositivo eficiente e confiável;
- Consegue atenuar suavemente tanto subpressões como sobrepressões;

- Não há limite para a sua atuação em termos de sobrepressões e subpressões, desde que ela seja dimensionada corretamente;
- Exige manutenção mínima para a sua operação.

Entretanto, também podem ser citadas as seguintes desvantagens para a adoção da Chaminé de Equilíbrio:

- Apresenta altíssimo custo de implantação;
- Existem dificuldades construtivas, devido a elevadas alturas exigidas para o seu funcionamento, além da necessidade de grande área disponível para a sua instalação;
- Não funciona para o processo de enchimento e esvaziamento de adutoras.

2.3.2. Tanques de Alimentação Unidirecional

Muito semelhantes às Chaminés de Equilíbrio, os Tanques de Alimentação Unidirecional (TAU's) consistem em reservatórios de altura reduzida, usualmente empregados para atenuar subpressões em adutoras. Os TAU's são abertos para a atmosfera e dotados de válvula de retenção, cuja função é proporcionar um fluxo unidirecional, somente do reservatório para a adutora, o que permite a sua utilização em qualquer condição de pressão. São instalados próximos à bomba ou em pontos elevados do perfil da adutora (BARBOSA, 2006).

A função do TAU é reduzir a subpressão resultante do desligamento da bomba, mantendo uma pressão mínima na adutora correspondente aproximadamente à altura da água no TAU. Assim, ele deve ter água suficiente para fornecer vazão que supra a necessidade ocasionada pelo desligamento da bomba. O TAU não apresenta função direta na onda de sobrepressão, mas, ao reduzir a subpressão, consegue agir na sobrepressão subsequente. A sua ação é suficiente para evitar a ruptura da coluna líquida em golpes de aríete mais severos (BARBOSA, 2006).

Segundo Tsutiya (2006), o TAU, se empregado em adutoras de grandes extensões, deverá ser acompanhado de outros dispositivos de proteção, servindo apenas como complemento para os mesmos. Portanto, o TAU cumpre a sua função eficientemente em adutoras de pequeno e médio portes, mas não é suficiente para a proteção de grandes sistemas hidráulicos.

Na Figura 16, está ilustrado um TAU presente em adutora localizada em Dourados, Mato Grosso do Sul.

Figura 16 – Tanque de Alimentação Unidirecional presente em adutora no Mato Grosso do Sul



Fonte: SANESUL (2021).

Podem-se citar as seguintes vantagens quando da utilização do TAU em sistemas hidráulicos:

- É um dispositivo eficiente e confiável para a atenuação de subpressões;
- Não há limite em sua aplicação para subpressões;
- O processo construtivo é simplificado, pois os materiais e a mão de obra são usuais.

Entretanto, existem as seguintes desvantagens:

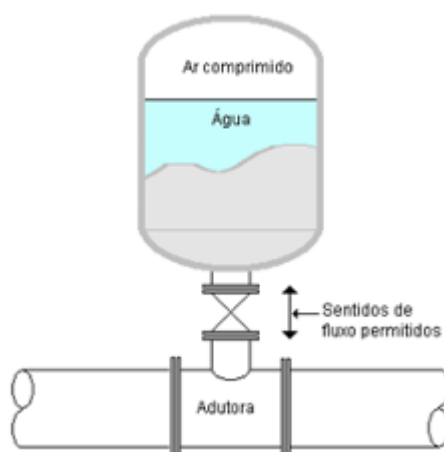
- Não funciona diretamente para a atenuação de sobrepressões;
- Não funciona no processo de enchimento e esvaziamento de adutoras;
- Apresenta alto custo de instalação;
- Exige boia e tubulação para mantê-lo com nível de água elevado e suficiente para a sua atuação, o que exige manutenções periódicas;
- Durante o fechamento, a válvula de retenção pode gerar um golpe secundário, que pode ser até maior do que o golpe de aríete original.

2.3.3. Reservatórios Hidropneumáticos

O Reservatório Hidropneumático (RHO) é um recipiente com ar comprimido presente na sua parte superior e água na parte inferior. De modo a restringir o fluxo de água para dentro ou para fora do reservatório, é instalado um orifício entre o RHO e a adutora, normalmente fabricado em um formato que propicia maior perda de carga no fluxo no sentido de entrada para o RHO do que de saída, denominado orifício diferencial. Ao longo da sua utilização, o RHO perde volume de ar, o que necessita da utilização de um compressor para pressurizá-lo novamente após determinado período de utilização (CHAUDHRY, 2014).

Na Figura 17, está representado um modelo esquemático de um RHO.

Figura 17 – Representação esquemática do RHO



Fonte: FENASAN (2017).

O RHO apresenta as seguintes vantagens ao ser utilizado como dispositivo de proteção contra o golpe de aríete:

- Atenua suavemente subpressões e sobrepressões;
- Não há limite para subpressões e sobrepressões;
- Substitui a Chaminé de Equilíbrio ao eliminar as dificuldades construtivas decorrentes de elevadas alturas e espaço físico disponível.

No entanto, também surgem as seguintes desvantagens:

- Altíssimo custo de implantação;
- Custo extra de operação com compressor em termos de energia e manutenção;
- Necessidade de vigilância e energia no local do compressor;

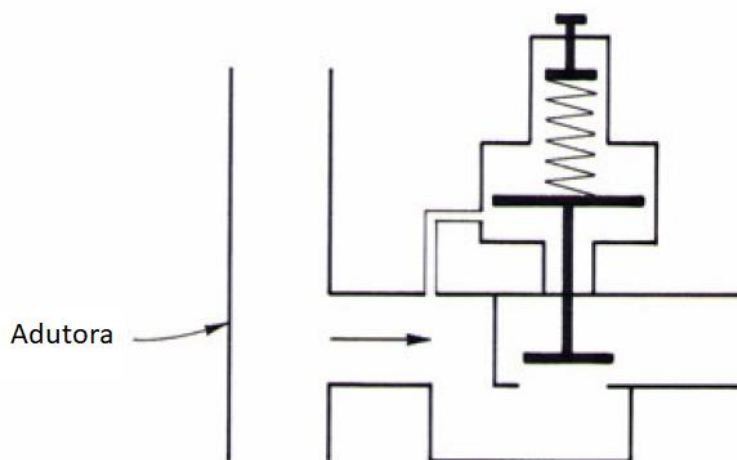
- Não funciona para o enchimento e o esvaziamento da adutora.

2.3.4. Válvulas de Alívio

Segundo Teixeira *et al.* (2023), a Válvula de Alívio de Pressão (*Pressure Relief Valve – PRV*) é uma válvula projetada para abrir durante o golpe de aríete no momento em que a pressão onde ela está instalada supera determinado valor configurado no dispositivo. Esse valor é denominado pressão de abertura ou de regulação.

O funcionamento da válvula ocorre de modo a promover um alívio de sobrepressões decorrente de sua abertura, o que ocasiona uma expulsão de determinado volume de água, aliviando a pressão interna do sistema. Após esse alívio de pressão e, conseqüentemente, a redução da pressão no ponto de instalação da válvula, ela fecha novamente. Na Figura 18, pode-se observar uma representação esquemática da Válvula de Alívio de Pressão.

Figura 18 – Representação esquemática da PRV



Fonte: Adaptado de Chaudhry (2014).

A PRV tem as seguintes vantagens em sua utilização:

- Dispositivo eficiente e confiável para atenuação de sobrepressões;
- Não há limite de aplicação para atenuação de sobrepressões;
- Apresenta manutenção mínima;
- Apresenta custo bastante competitivo se comparada a outras soluções.

Porém, também surgem desvantagens que podem prejudicar a sua escolha, tais quais:

- Não funciona para a atenuação de subpressões;

- Não funciona durante o processo de enchimento e esvaziamento de adutoras;
- No momento de seu fechamento, pode gerar golpes secundários, que podem ser até maiores do que o golpe de aríete original.

2.3.5. Ventosas

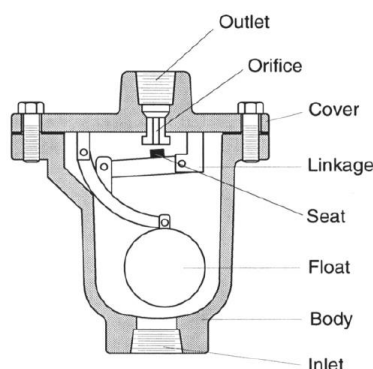
Segundo Júnior (2007, apud Barbosa, 2015), “as ventosas são dispositivos hidromecânicos projetados para admitir ou expulsar automaticamente grandes quantidades de ar durante o enchimento, esvaziamento ou operação de um sistema de adução de água”.

As Ventosas são muito importantes na redução da quantidade de ar presente nas tubulações. O ar aprisionado é bastante prejudicial às adutoras, caso não seja retirado adequadamente (CHAIKO *et al.*, 2001, apud BARBOSA, 2015). Normalmente, as Ventosas são instaladas nos pontos altos da adutora, por se tratarem de locais mais propícios à acumulação de ar.

Existem três tipos principais de Ventosa (AWWA, 2001): de Pequeno Orifício (Air-release Valves), de Grande Orifício (Air Vacuum Valves) e de Tríplice Função (Combination Air Valves).

As Ventosas de Pequeno Orifício apresentam um mecanismo de expulsão de pequenas quantidades de ar no momento em que a pressão excede a atmosférica. A expulsão ocorre através de um orifício cujo Diâmetro Nominal fica entre 1,6 e 25 mm (BARBOSA, 2015). Na Figura 19, há uma Ventosa desse tipo representada.

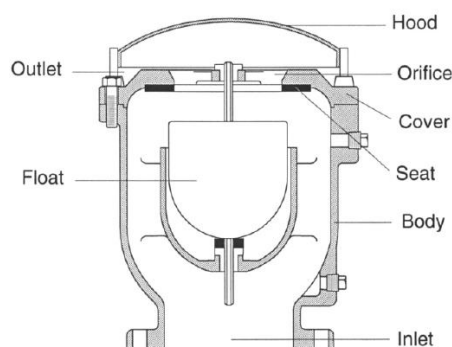
Figura 19 – Ventosa de Pequeno Orifício



Fonte: AWWA (2001).

As Ventosas de Grande Orifício apresentam orifício que permite a expulsão de grandes quantidades de ar durante o enchimento da tubulação, assim como também permite grande admissão de ar no caso de a pressão ficar abaixo da atmosférica. Apresentam orifício entre 13 e 500 mm ou maior (BARBOSA, 2015). A Figura 20 ilustra uma Ventosa desse tipo.

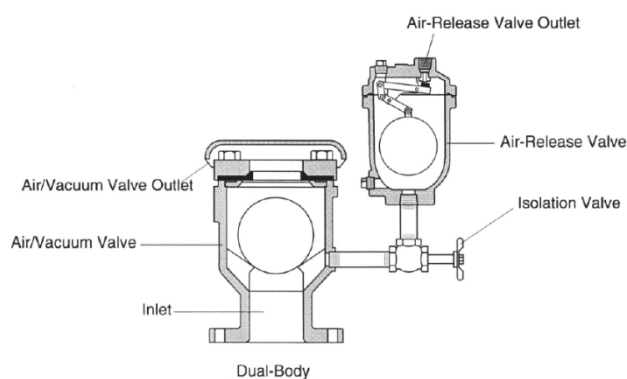
Figura 20 – Ventosa de Grande Orifício



Fonte: AWWA (2001).

As Ventosas de Tríplice Função são projetadas para executar a mesma função dos dois tipos anteriores, combinando os seus efeitos. Pode ser composta de um dispositivo com pequeno orifício para expulsão suave do ar, evitando a geração de ondas de subpressão e sobrepressão. Ela pode apresentar, também, um orifício cinético que, ao perceber pressão abaixo da atmosférica, abre, permitindo a entrada de ar na tubulação. Com essa entrada de ar, a pressão tende a subir e, caso ultrapasse a atmosférica, inicia-se o processo de expulsão de ar na Ventosa (BARBOSA, 2015). Na Figura 21, há uma representação desse tipo de Ventosa.

Figura 21 – Ventosa de Tríplice Função



Fonte: AWWA (2001).

A Ventosa é um dispositivo que apresenta as seguintes vantagens ao ser utilizada como medida de proteção contra o golpe de aríete:

- Apresenta baixo custo;
- Único dispositivo que consegue atuar junto ao processo de enchimento e esvaziamento de adutora, assim como também atua no caso de desligamento abrupto da bomba;
- Consegue eliminar ar aprisionado em pontos altos durante o funcionamento da adutora em regime permanente, contribuindo para a eficiência do bombeamento.

As desvantagens da adoção da Ventosa são as seguintes:

- Injeta ar na adutora, ao invés de água. Isso pode gerar dois problemas: esse ar precisa ser expulso posteriormente, normalmente por outra Ventosa; não se garante, nessa situação, a neutralização da ruptura da coluna líquida;
- Atua somente para subpressões com limites maiores que -8 mca ($SDR < 20$) e -6 mca ($SDR > 20$), sendo SDR a razão entre o diâmetro e a espessura da tubulação [-].

2.3.6. Válvulas de Retenção

A Válvula de Retenção é um tipo de válvula instalada de modo a impedir a passagem de fluxo reverso para a bomba ou para o TAU, conforme já comentado no tópico 2.2.2.

Os propósitos da Válvula de Retenção são: prevenir a perda de volume de água durante o fluxo reverso, prevenir o funcionamento desgovernado da bomba e promover um desligamento controlado do sistema hidráulico com restrições aceitáveis. A Válvula de Retenção ideal é aquela que fecha no momento em que a velocidade do fluxo atinge zero. Isso permite controlar o golpe de aríete causado pelo fechamento abrupto da válvula, mas pode gerar pressões dentro de níveis inaceitáveis (WYLIE; STREETER, 1993).

Existem diversos tipos de Válvula de Retenção, podendo ser classificadas como: Horizontal, Vertical, Portinhola, Fundo de Poço e Disco.

A Válvula de Retenção Horizontal se assemelha a válvulas tipo globo e só deve ser instalada horizontalmente na tubulação. Ela depende da pressão exercida pelo fluido para levantar o obturador e permitir a passagem de vazão. Caso a pressão não seja forte o suficiente

para abrir o obturador, a válvula se fecha pela força da gravidade (VAL AÇO, [s.d.]). Na Figura 22, está ilustrado esse tipo de válvula.

Figura 22 – Válvula de Retenção Horizontal



Fonte: Val Aço [s.d.].

A Válvula de Retenção Vertical é semelhante à Horizontal, mas só deve ser instalada verticalmente e depende da pressão para empurrar o obturador para cima e permitir a passagem do fluxo. A válvula se fecha automaticamente pela ação da gravidade caso a pressão não seja forte o suficiente para abrir o obturador (VAL AÇO, [s.d.]). A Figura 23 mostra esse tipo de válvula.

Figura 23 – Válvula de Retenção Vertical



Fonte: Val Aço [s.d.].

A Válvula de Retenção tipo Portinhola apresenta um eixo com uma portinhola, cujo movimento de translação permite ou impede a passagem do fluxo. Esse tipo de válvula é indicado para situações em que a velocidade do fluido é baixa, pois o fechamento rápido pode danificar a portinhola ou o corpo da válvula. Suportam grandes pressões (VAL AÇO, [s.d.]). Na Figura 24, pode-se observar a válvula nessa configuração.

Figura 24 – Válvula de Retenção tipo Portinhola



Fonte: Val Aço [s.d.].

A Válvula de Retenção Fundo de Poço tem funcionamento semelhante ao da Vertical, mas a parte inferior apresenta um crivo, que é por onde a água passa para entrar na válvula. Durante o funcionamento das bombas de sucção, o obturador levanta, permitindo a passagem do fluido. Se a bomba desligar, o obturador fecha com a ação da gravidade (VAL AÇO, [s.d.]). A Figura 25 exibe esse tipo de válvula.

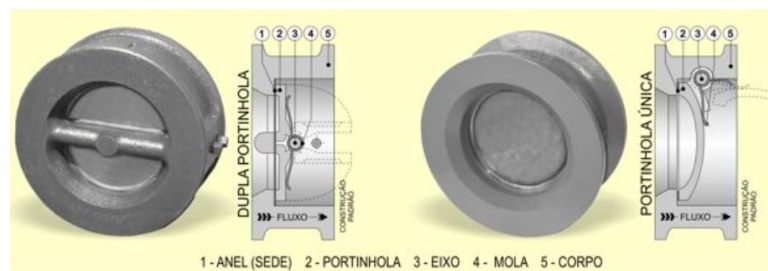
Figura 25 – Válvula de Retenção tipo Fundo de Poço



Fonte: Val Aço [s.d.].

Por fim, existe a Válvula de Retenção tipo Disco, que é subdividida em dois tipos: com discos duplos, também chamada de dupla portinhola, e de disco integral, ou de portinhola única. Ambos apresentam corpo estreito para serem instalados entre flanges e podem ser instaladas tanto vertical quanto horizontalmente (VAL AÇO, [s.d.]). A Figura 26 possibilita a visualização de válvulas nessa configuração.

Figura 26 – Válvula de Retenção tipo Disco (com portinhola dupla e única)



Fonte: Val Aço [s.d.].

Podem ser destacados os seguintes tópicos referentes às vantagens de instalação da Válvula de Retenção:

- Apresenta baixo custo de instalação e manutenção;
- Funciona tanto para água como para esgoto.

Todavia, também é possível elencar as desvantagens abaixo:

- Não apresenta efeito de atenuação de subpressões a jusante da válvula;
- Pode promover golpes secundários ao fechar, que pode ser até maior que o golpe de aríete original.

2.3.7. Volantes de Inércia

O Volante de Inércia consiste em uma peça cilíndrica vazada instalada no eixo da bomba, com capacidade de armazenar energia cinética por restauração da quantidade de movimento angular. Ele funciona aumentando a inércia do sistema para posterior desaceleração de tal forma a protegê-lo de desligamentos de bombas provocados por falhas de energia (EL-KHATIB; ABDEL-NABY; HAMMOUD, 2016).

Um exemplo de Volante de Inércia pode ser visualizado na Figura 27.

Figura 27 – Volante de Inércia



Fonte: Scpolias [s.d.].

Ao optar por essa solução contra o golpe de aríete, surgem como vantagens:

- É um dispositivo que atenua suavemente subpressões e sobrepressões;
- Não existe limite de aplicação para subpressão ou sobrepressão;
- Praticamente dispensa manutenções;
- Apresenta baixo custo.

Em contrapartida, pode ser destacada como desvantagem:

- Em toda partida do motor, há gasto desnecessário de energia.

2.4. Modelos de Cavitação, Fator de Atrito e Celeridade Variáveis aplicados ao Cálculo do Regime Transiente

Neste trabalho, foi utilizado o modelo de cavitação desenvolvido no UFC 7 por Paiva (2023), denominado Método da Cavitação com Vazios e Amortecimento de Ondas (CMVWD), que incorpora os parâmetros de cavitação gasosa com celeridade variável, fator de atrito variável, consideração dos vazios e processo termodinâmico que ocorre nas tubulações de adutoras de água.

Portanto, os tópicos seguintes trazem uma contextualização sobre o fenômeno de cavitação incorporado ao MOC e dos principais modelos e premissas adotadas para o desenvolvimento da metodologia do trabalho de Paiva (2023), uma vez que foram utilizadas para a obtenção dos resultados desta pesquisa.

2.4.1. Fluxo Bifásico e Cavitação

O MOC não leva em consideração os efeitos da presença de ar incorporado ao fluxo nas tubulações. Em muitas situações transitórias em adutoras, é possível produzir baixas pressões e, dependendo da intensidade do fenômeno, é possível atingir a pressão de vapor da água (KESSAL; AMAOUCHE, 2001 apud PAIVA, 2023).

Ao atingir essa pressão, o líquido se transforma em vapor, o que ocasiona a cavitação. Caso o vapor preencha toda a seção transversal da adutora em algum ponto, ocorre a separação da coluna líquida. No posterior reencontro das colunas líquidas, ocorre um colapso, o que gera pressões ainda maiores. Assim, é fundamental estudar modelos que consideram o fluxo bifásico, ou seja, o fluxo com duas fases distintas (líquida e gasosa) (TIJSSELING; VARDY; FAN, 1996).

Os grupos de modelos mais comuns utilizados para a consideração da cavitação nos transientes hidráulicos são o DGCM (*Discrete Gas Cavity Model*) e DVCM (*Discrete Vapor Cavity Model*). Ambos os grupos podem ser aplicados para resolver problemas relacionados a golpe de aríete com fluxo bifásico, conforme destacado por Soares *et al.* (2009).

O primeiro grupo resolve situações em que a pressão pode ficar abaixo da pressão de saturação, mas acima da pressão de vapor do líquido. Nesse caso, há microbolhas de gás livre presentes, contribuindo para a redução da celeridade da onda. Assim, nessas circunstâncias, o volume de gás oscila durante a ocorrência do golpe de aríete (SHU, 2003).

Já o segundo grupo é aplicado quando há presença de bolsas de ar localizadas nos pontos altos do sistema. Também podem aparecer cavidades intermediárias, resultantes da interação entre duas ondas de baixa pressão ao longo da tubulação (SHU, 2003).

Destaca-se que em alguns estudos, como os desenvolvidos por Pearsall (1965), houve redução na velocidade da onda de até 75% devido à presença de ar ou gás livre, o que influencia diretamente nos resultados obtidos para o regime transiente. Também cabe mencionar que o principal problema provocado pela presença de ar nas tubulações é a dispersão das bolhas de ar e posterior junção das colunas líquidas anteriormente separadas, o que pode provocar altas pressões, segundo Chaudhry (2014).

2.4.2. Modelo DGCM

Os líquidos têm uma característica peculiar, que é a capacidade de absorver ou expelir gás livre quando a superfície do fluido entra em contato com a atmosfera. Dessa forma, surgiu a necessidade de considerar essa característica nos modelos que calculam o regime transiente (PAIVA, 2023).

Um tipo de modelo que surgiu propondo a incorporação dessa capacidade dos líquidos de interagir com o gás livre foi o DGCM, cuja principal função é prever fenômenos transitórios em escoamentos subatmosféricos, também chamados de cavitação gasosa. Segundo Bergant *et al.* (2006), o DGCM vem sendo utilizado principalmente nos últimos 30 anos para pesquisas que envolvem a cavitação gasosa.

Provoost (1976), Provoost e Wylie (1982), De Vries (1973) e Wylie (1984) utilizaram a Lei dos Gases Ideais respeitando o processo termodinâmico, obtendo-se as Equações (80) e (81):

$$\alpha_{DGCM} = \frac{M_g \cdot R \cdot T_{abs}}{P_g^* \cdot V_m} \quad (80)$$

$$V_g = \alpha \cdot V_m \quad (81)$$

Sendo α_{DGCM} um adimensional do modelo DGCM [-]; M_g a massa de gás livre [M]; R a constante do gás [$M L^2 T^{-2} \theta^{-1} n^{-1}$]; T_{abs} a temperatura absoluta [θ]; P_g^* a pressão absoluta do gás [$M L^{-1} T^{-2}$]; V_m o volume da mistura [L^3] e V_g o volume total do gás [L^3].

O volume do gás pode ser calculado pela Equação (82):

$$\frac{dV_g}{dt} = Q_{Pu} - Q_{Pd} \quad (82)$$

Sendo Q_{Pu} e Q_{Pd} , respectivamente, as vazões a montante e a jusante em cada seção computacional.

A celeridade da onda foi modificada para considerar o fluxo bifásico, modificando-se de celeridade do líquido para celeridade da mistura, representada na Equação (83):

$$a_m = \frac{a_0}{\sqrt{1 + \frac{a_g \cdot \rho \cdot a_0^2}{P_m^*}}} \quad (83)$$

Sendo a_m a celeridade da mistura [$L T^{-1}$]; a_0 a celeridade do líquido [$L T^{-1}$]; a_g a fração do gás livre [-]; ρ a massa específica do fluido [$M L^{-3}$] e P_m^* a pressão absoluta da mistura [$M L^{-1} T^{-2}$].

Para a grade escalonada do MOC, no modelo DGCM, propõe-se utilizar a Equação (84):

$$V_g^t = V_g^{t-2\Delta t} + [\psi \cdot (Q_{Pu}^t - Q_{Pd}^t) + (1 + \psi) \cdot (Q_{Pu}^{t-2\Delta t} - Q_{Pd}^{t-2\Delta t})] \cdot 2\Delta t \quad (84)$$

Em que sobrescritos t e $t - 2\Delta t$ representam a variável no passo de tempo atual e a dois passos de tempo anteriores, respectivamente. Já ψ é um adimensional que varia entre 0 e 1, sendo que Wylie e Streeter (1993) verificaram que um valor superior a 0,5 pode evitar oscilações numéricas (PAIVA, 2023).

Segundo Paiva (2023), os trabalhos de Wylie e Streeter (1993), Bergant e Simpson (1999), Liou (2000), Malekpour e Karney (2014), Soares *et al.* (2015) e Jensen (2018) realizaram testes com o modelo DGCM, demonstrando convergências entre os resultados obtidos experimental e computacionalmente. Portanto, o DGCM foi adotado para incorporar o Modelo CMVWD por reproduzir resultados mais aceitáveis, já que as cavidades formadas pelos gases são distribuídas ao longo das seções da tubulação (ZHOU *et al.*, 2018; SOARES *et al.*, 2017 apud PAIVA, 2023).

2.4.3. Celeridade Variável com Modelo Politrópico Termodinâmico

Em modelos de cavitação, a partir da variação das propriedades do fluido, é possível perceber variações da velocidade da onda que, caso sejam desprezadas, podem levar a erros de previsões dos resultados do regime transiente (PAIVA, 2023).

Dinh Tam (2009) desenvolveu um modelo de velocidade de onda variável, considerando-se a variação local da velocidade devido ao conteúdo de gás presente e seus efeitos, assumindo uma massa de controle da mistura bifásica (gás e líquido) com um volume de gás disperso em pequenas bolhas livres. Nesse sistema, há uma mudança politrópica devido ao calor transferido para a água. Conceitualmente, um processo politrópico é todo processo reversível que obedeça à Equação (85):

$$P \cdot V_g^k = constante \quad (85)$$

Portanto, em um processo politrópico, um incremento de pressão provoca alterações no volume total do gás, assim como no módulo de elasticidade do fluido e na

celeridade da onda. O cálculo numérico da celeridade, presente na Equação (86), considerando essas variações foi proposta por Lee *et al.* (2008).

$$a_{j,k} = \left[\rho \cdot (1 - \varepsilon_{j,k-\Delta t}) \cdot \left(\frac{1}{K} + \frac{\varepsilon_{j,k-\Delta t}}{n_a \cdot P_{j,k-\Delta t}} + \frac{c_l \cdot D}{e \cdot E} \right) \right]^{-1/2} \quad (86)$$

Sendo $a_{j,k}$ a celeridade da onda no passo de tempo atual no tubo i e seção j [$L \cdot T^{-1}$]; $\varepsilon_{j,k-\Delta t}$ a fração de vazios no passo de tempo anterior no tubo i e seção j [-]; K o módulo de elasticidade volumétrica do fluido [$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$]; n_a a constante anisotrópica [-]; $P_{j,k-\Delta t}$ a pressão no passo de tempo anterior no tubo i e seção j [$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$]; c_l o parâmetro de ancoragem do tubo [-]; D o diâmetro do tubo [L]; e a espessura do tubo [L] e E o módulo de elasticidade do tubo [$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$].

Assim, esse modelo depende da fração de vazios em uma seção computacional e passo de tempo ao longo da tubulação, somado a uma pressão local transitória, além do índice de vazios de vapor inicial e pressão de vapor. Logo, a equação da fração de vazios se baseia no processo adiabático da termodinâmica e no desenvolvimento da Equação de Laplace-Poisson. Além disso, o Δx é calculado conforme a condição de estabilidade de Courant (Equação (26)). Por fim, Paiva (2023) desenvolveu a Equação (87) para a obtenção da fração de vazios:

$$\varepsilon_{j,k} = \left(\frac{P_{j,k-\Delta t}}{P_{j,k}} \right)^{1/n_a} \cdot \varepsilon_{j,k-\Delta t} \quad (87)$$

Sendo $\varepsilon_{j,k}$ a fração de vazios no passo de tempo atual no tubo i e seção j [-] e $P_{j,k}$ a pressão no passo de tempo atual no tubo i e seção j [$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$].

2.4.4. Modelos de Fator de Atrito Variável: Aceleração Instantânea

Os modelos de fator de atrito variável consideram que o termo de dissipação J possui uma componente permanente e outra não permanente, resultando em maiores amortecimentos dos picos de pressão (TEIXEIRA *et al.*, 2022). Essa dissipação de energia está diretamente relacionada a perdas por atrito entre o fluido e as paredes da tubulação.

Ao longo dos anos, diversos pesquisadores estudaram acerca da dissipação de energia promovida nos transientes, em especial com a utilização de dados experimentais. Pode-se citar o Modelo da Aceleração Instantânea, inicialmente sugerido por Brunone e Greco (1990) e posteriormente atualizado por Vítkovský *et al.* (2000) a partir de estabilidades encontradas

em testes experimentais, e que depende da aceleração instantânea, da aceleração convectiva e de um coeficiente de amortecimento, obtido experimentalmente ou por valores derivados de outros trabalhos com características semelhantes. Esse valor também pode ser obtido a partir do número de Reynolds inicial e com uma variação local, o que demonstra melhores resultados (PAIVA, 2023). O coeficiente de atrito de Brunone (k_3) pode ser encontrado empírica ou analiticamente pelo coeficiente de decaimento de cisalhamento de Vardy (C^*). Esse processo é dado pelas Equações (88), (89) e (90):

$$k_3 = \frac{\sqrt{C^*}}{2} \quad (88)$$

$$C^* = 0,000476 \rightarrow \text{fluxo laminar} \quad (89)$$

$$C^* = \frac{7,41}{Re^{\log\left(\frac{14,3}{Re^{0,05}}\right)}} \rightarrow \text{fluxo turbulento} \quad (90)$$

Sendo Re o número de Reynolds [-].

Assim, considerando as equações características do MOC, no Modelo de Aceleração Instantânea, modifica-se o termo de dissipação incorporando o coeficiente k_3 conforme a Equação (91):

$$J_u = \frac{a_{j,k} \cdot k_3 \cdot \Delta t}{g \cdot A} \cdot \left(\frac{\partial Q}{\partial t} - a_{j,k} \cdot \text{sign}(Q) \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} \right) \quad (91)$$

Sendo $\text{sign}(Q)$ o sinal da vazão, que é positivo quando a velocidade é maior ou igual a zero e negativo quando a velocidade é menor que zero, convencionando-se que o sinal positivo da velocidade ocorre quando a onda de pressão se movimenta da esquerda para a direita.

Embora o fator de atrito variável tenha efeito significativo no regime transiente, raramente os softwares o utilizam. Porém, à medida que as pesquisas foram realizadas, uma parcela dos estudiosos focou suas investigações na consideração do atrito variável durante o golpe de aríete, resultando em melhores dispersões das ondas de pressão (ABDELDAYEM *et al.*, 2021).

2.4.5. Método da Cavitação com Vazios e Amortecimento de Ondas (CMVWD)

Proposto por Paiva (2023), o modelo denominado Método da Cavitação com Vazios e Amortecimento de Ondas leva em consideração que o fluxo bifásico possa ser entendido não somente como gás e líquido ou vapor e líquido, mas que considere que tudo que não fosse líquido fosse incorporado no cálculo de um adimensional respeitando o processo termodinâmico.

O método base para a solução das equações do momento e da continuidade foi o MOC. Assim, de forma unidimensional, os métodos de fluxo bifásico, celeridade variável, fator de atrito variável e processo termodinâmico são resolvidos pelo MOC, alterando-se todas essas variáveis ao longo do comprimento da tubulação. Para resolver as equações do fluxo bifásico, foi adotado o modelo DGCM, considerando-se uma cavitação gasosa pontual e distribuída e possibilitando implementar a equação da fração de vazios inicial. Além disso, a celeridade da onda foi adotada como variável e dependente da pressão e da fração de vazios. Por fim, para o fator de atrito variável, foi utilizado o Método da Aceleração Instantânea e a equação do coeficiente de amortecimento.

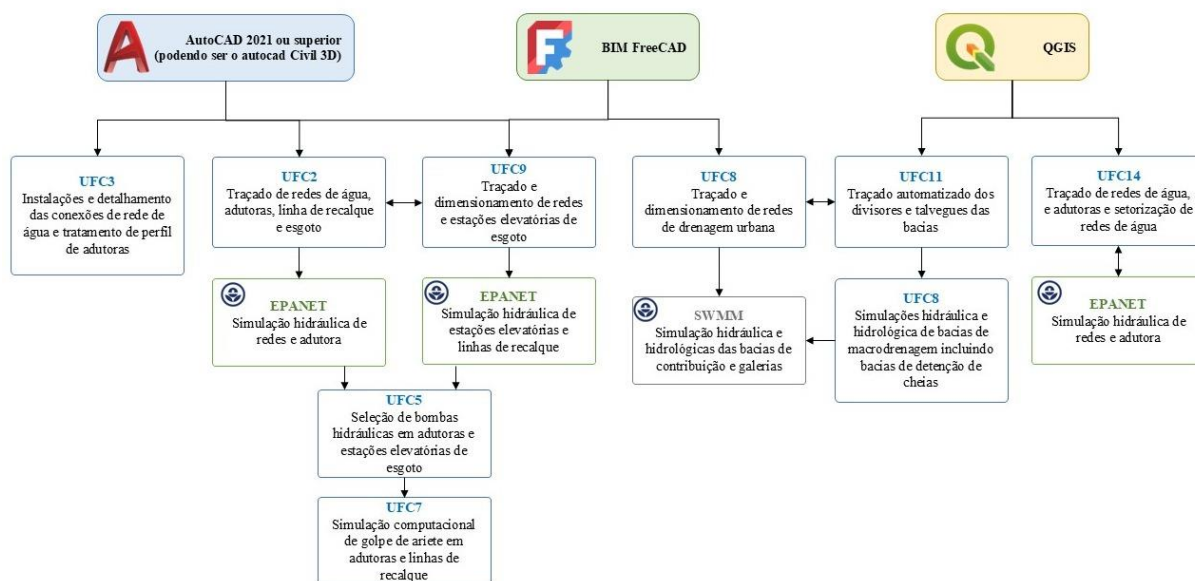
A formulação detalhada e o fluxograma da implementação desses modelos no UFC 7 podem ser consultados no trabalho desenvolvido por Paiva (2023).

2.5. Módulos do Sistema UFC

O Sistema UFC é um conjunto de programas voltado para a solução de problemas envolvendo Engenharia Hidráulica e Sanitária, desenvolvido em diversas linguagens de programação pelo LAHC da UFC. O Sistema realiza traçados e dimensionamentos de Redes de Abastecimento de Água, Adutoras, Redes de Coleta de Esgoto Sanitário, Redes de Microdrenagem Urbana e Simulação Hidrológica e Hidráulica de Sistemas de Macrodrenagem.

O Sistema é dividido em vários módulos, cada um responsável por funções específicas. Na Figura 28, pode-se observar a representação esquemática referente à estruturação do Sistema UFC.

Figura 28 – Diagrama estrutural do Sistema UFC

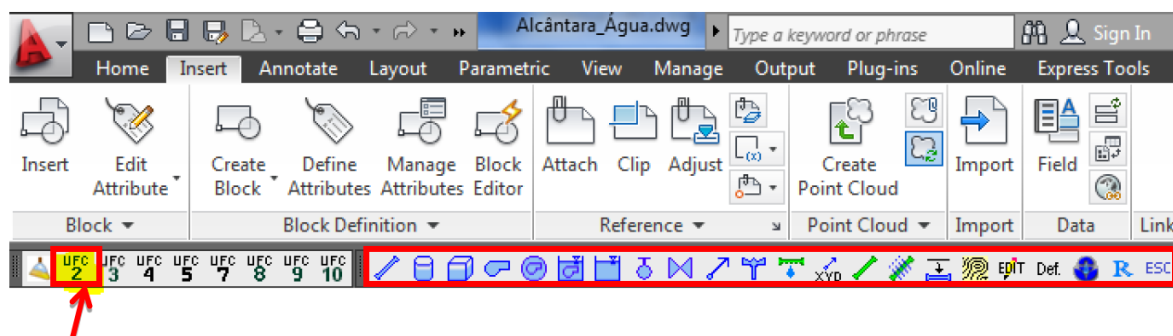


Fonte: LAHC (2026).

Os Módulos UFC 2 e UFC 4 apresentam rotinas que estabelecem uma interface com os softwares AutoCAD e EPANET. O principal objetivo dessa interface é a criação de um arquivo de entrada para simulação hidráulica por meio do traçado de redes ou adutoras (UFC 2), com elementos gráficos do AutoCAD, para posterior dimensionamento otimizado de redes (UFC 4). São pacotes computacionais para criação dinâmica de exportação de arquivos do AutoCAD para o EPANET, utilizando a linguagem de programação AutoLISP para tanto (LAHC, [s.d.]).

O AutoCAD é o software desenvolvido pela *Autodesk* para a otimização de ferramentas de desenho e projeto, enquanto que o EPANET é um software específico para o cálculo hidráulico de redes de conduto forçado, gerando dados de saída, como pressão nos nós e vazão nos trechos da rede em estudo. Na Figura 29, pode-se visualizar o módulo do UFC 2 integrado ao ambiente de desenho do AutoCAD. Vale ressaltar que o UFC 4 não apresenta interface de integração com o AutoCAD.

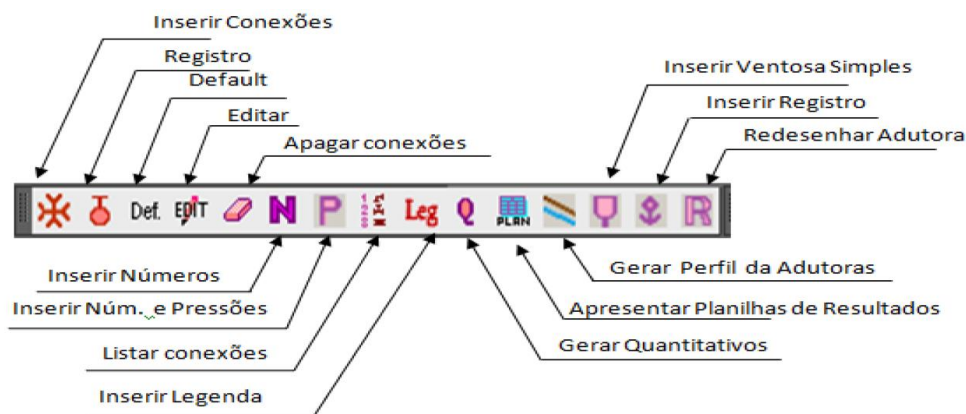
Figura 29 – Módulo UFC 2 integrado ao AutoCAD



Fonte: LAHC [s.d.].

O UFC 3 é utilizado para inserção e remoção de conexões, ventosas, registros e funções correlacionadas. Ele pode ser utilizado em conjunto com o UFC 2 para auxiliar no traçado de redes ou adutoras. O UFC 3 também apresenta interface de integração com o AutoCAD, conforme explicitado na Figura 30, que apresenta as funções presentes nesse módulo.

Figura 30 – Ferramentas do UFC 3



Fonte: LAHC [s.d.].

O UFC 5 é o módulo de seleção de bombas do Sistema UFC. Ele funciona, primeiramente, com a seleção do arquivo da bomba feita pelo usuário dentro do ambiente do AutoCAD, após a definição da adutora. A partir desse arquivo, o programa irá construir a curva da bomba e compará-la com a curva do sistema, considerando todas as perdas de carga envolvidas. Por meio dessa comparação, será possível a obtenção do ponto de operação da bomba, a partir do cruzamento entre as duas curvas. Além disso, o programa também exibirá a curva de eficiência *versus* vazão da bomba escolhida. O programa também possibilita a inserção

de várias bombas em série ou em paralelo. Na Figura 31, há um exemplo de aplicação do UFC 5 em uma situação específica com três bombas em paralelo.

Figura 31 – Interface do UFC 5

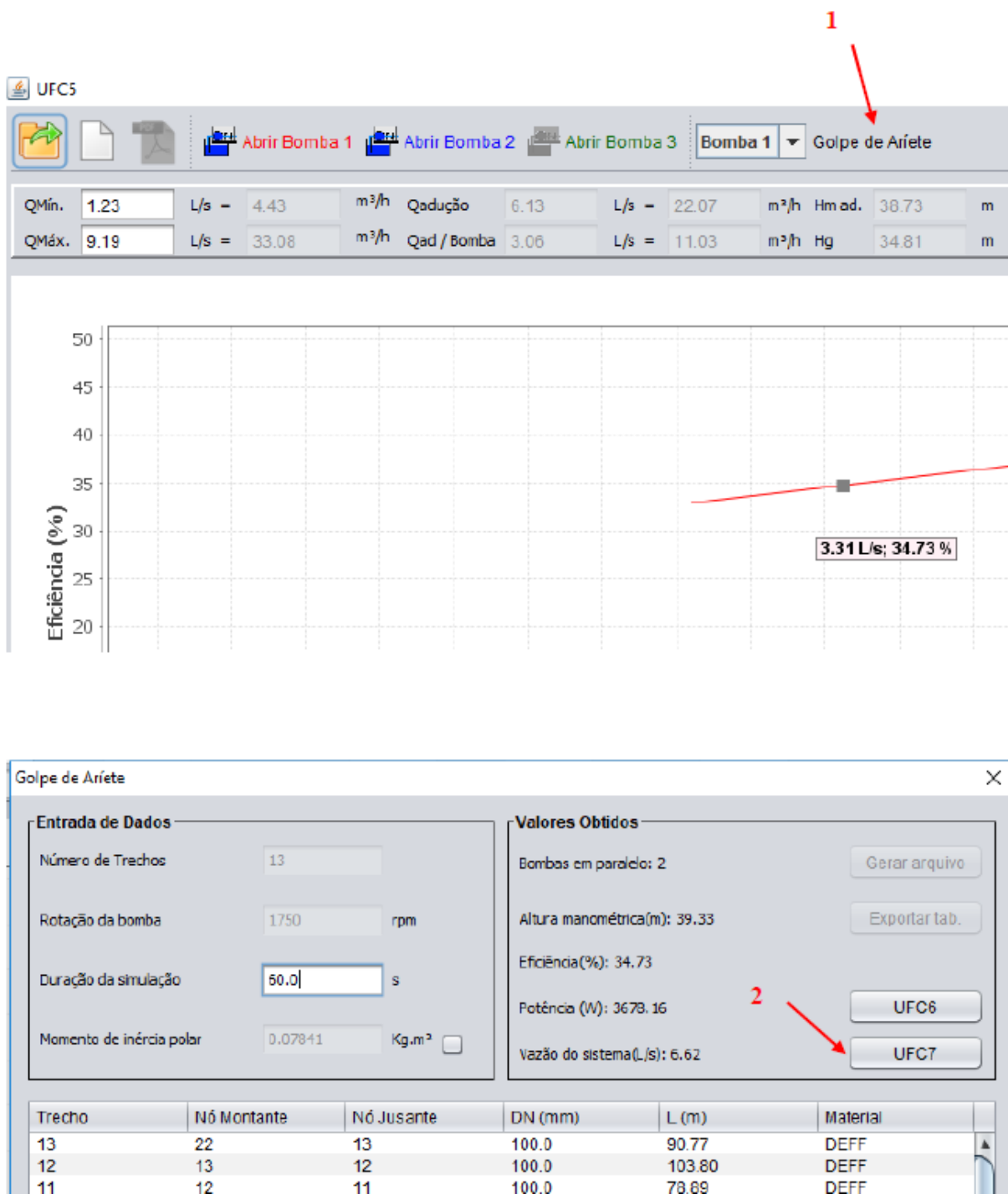


Fonte: LAHC [s.d.].

O UFC 6 é o antigo módulo utilizado para a simulação do transitório hidráulico. Atualmente, ele está em desuso, pois foi substituído pelo UFC 7, que é escrito na linguagem de programação Java e funciona a partir da inserção de dados de entrada de adutoras ou redes, realizando a simulação do transitório a partir do fechamento de válvulas ou desligamento de bombas. O UFC 7 permite a visualização das pressões máximas (sobrepções) e mínimas (subpções) resultantes do golpe de aríete ocasionado pelas operações de fechamento de válvulas ou desligamento de bombas. O UFC 7 pode ser acessado a partir da interface do UFC 5, por meio do botão “Golpe de Aríete” (1) e, na janela seguinte, no botão “UFC 7” (2), conforme visualizado na Figura 32. Nessa etapa, será criado um arquivo do tipo .pth na mesma pasta onde está o arquivo do AutoCAD e cuja leitura é efetuada pelo UFC 7. Caso o usuário

feche o UFC 7 e precise novamente acessar o arquivo .pth, basta efetuar a sua leitura diretamente pelo executável do UFC 7.

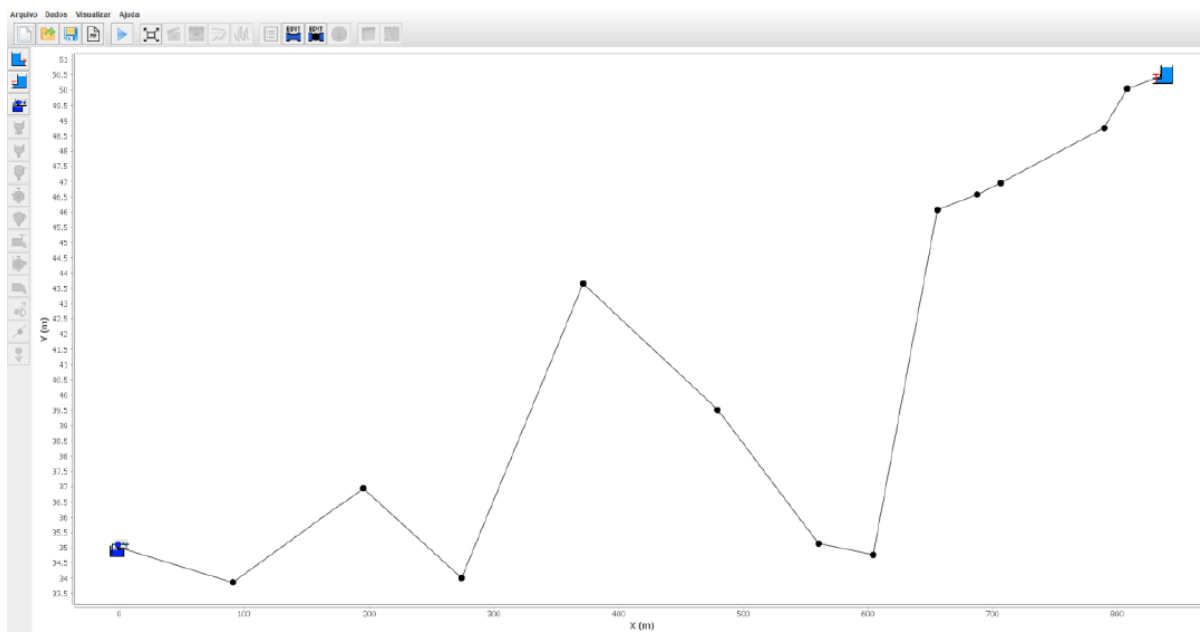
Figura 32 – Integração entre o UFC 5 e o UFC 7



Fonte: LAHC [s.d.].

Após os processos demonstrados na Figura 32, será aberta uma janela com interface Java referente ao UFC 7, como a apresentada na Figura 33.

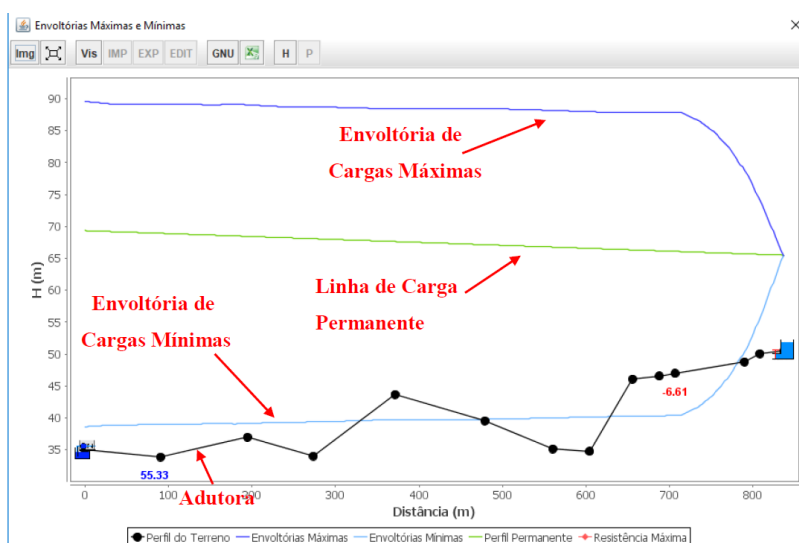
Figura 33 – Interface do UFC 7



Fonte: LAHC [s.d.].

Assim, é possível realizar a simulação do transitório, nesse caso, pelo desligamento de bomba. Em seguida, será exibida uma janela com as envoltórias de pressão geradas a partir do golpe de aríete simulado. As envoltórias obtidas para essa simulação estão na Figura 34.

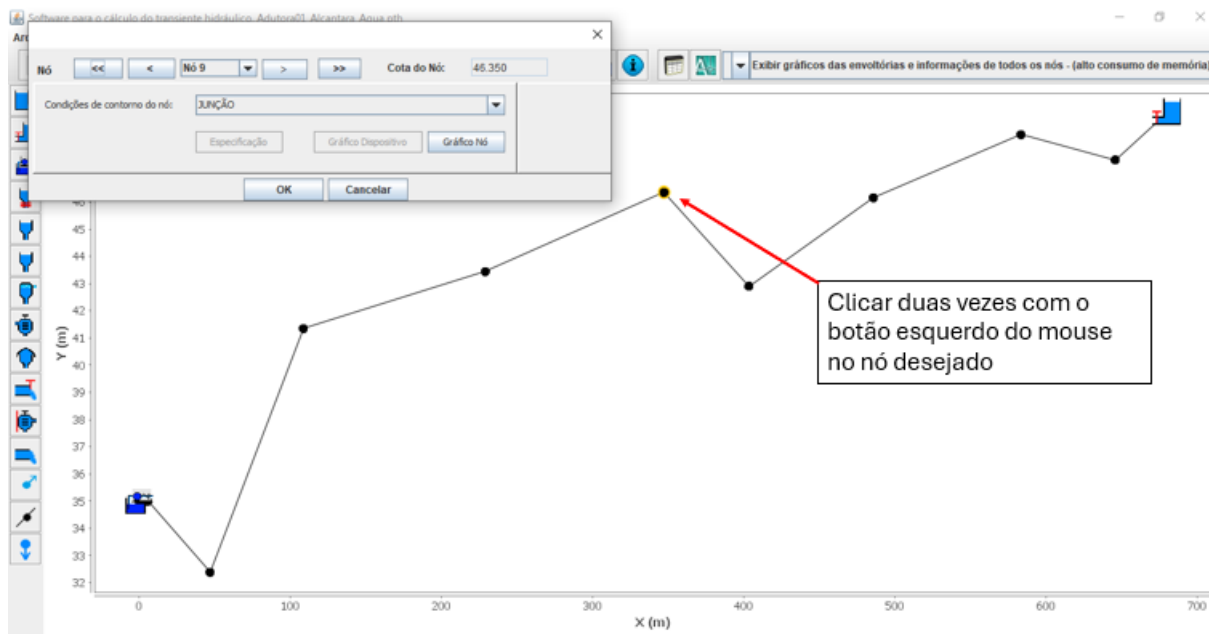
Figura 34 – Envoltórias máximas, mínimas e linha permanente



Fonte: LAHC [s.d.].

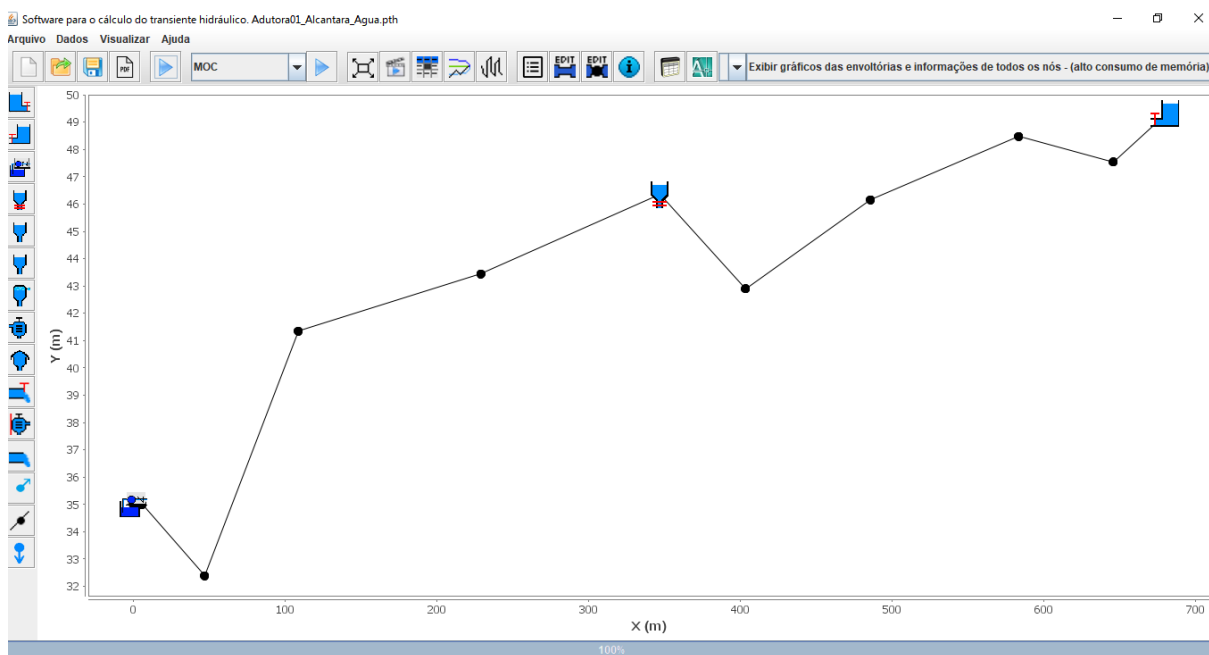
O UFC 7 também permite a inserção de dispositivos de proteção contra o golpe de aríete, clicando em algum dos nós da adutora ou rede e selecionando a condição de contorno desejada, conforme Figura 35 e Figura 36.

Figura 35 – Inserção de dispositivos de proteção contra o golpe de aríete no UFC 7



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

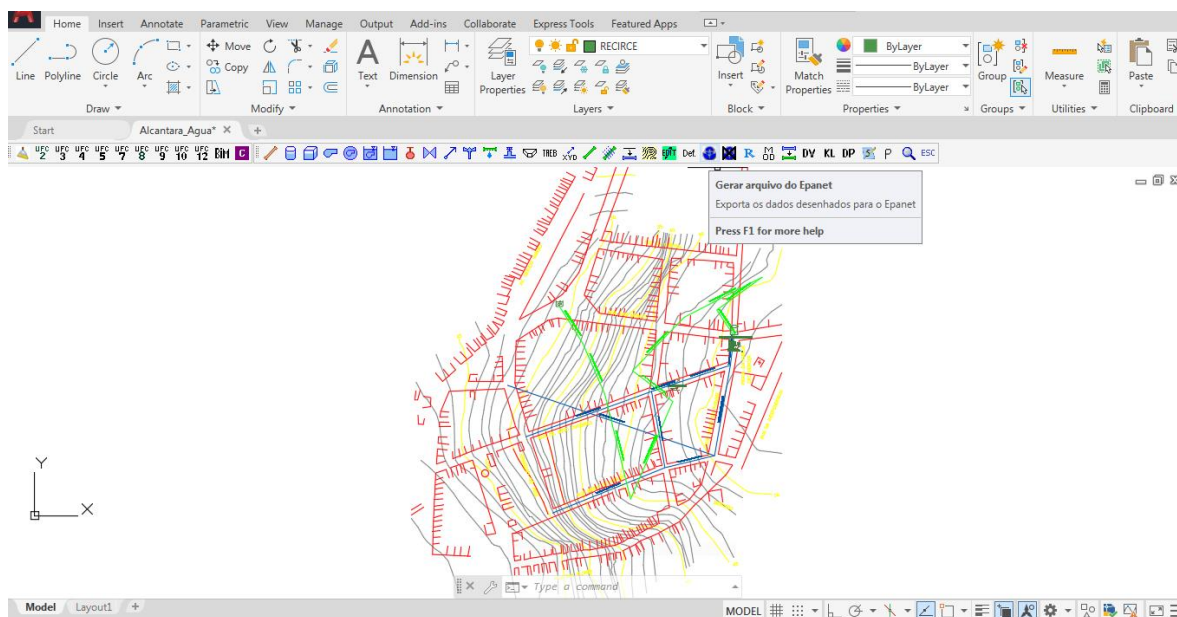
Figura 36 – Inserção de TAU em nó selecionado no UFC 7



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Também é possível acessar o UFC 7 por meio do UFC 2. Nesse caminho, o arquivo da rede ou da adutora é criado pelo UFC 2 e exportado para o EPANET, gerando o arquivo na extensão .inp. Para isso, deve-se acessar o comando “Gerar arquivo do EPANET” do UFC 2, como pode ser visualizado na Figura 37.

Figura 37 – Comando de geração do arquivo do EPANET por meio do UFC 2

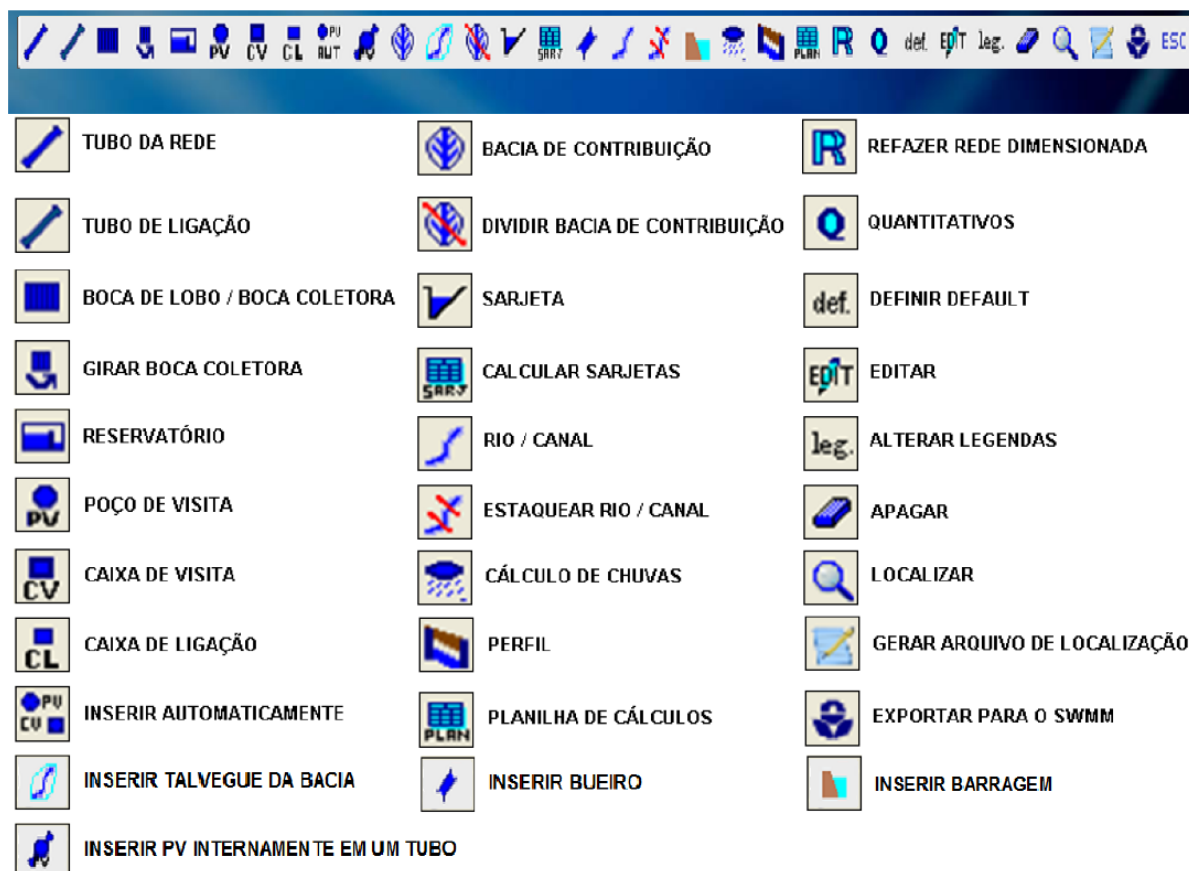


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Em seguida, será aberto o EPANET com o arquivo gerado no UFC 2, podendo-se efetuar a simulação do regime permanente para posterior exportação do relatório completo, que corresponde ao arquivo .rpt. A próxima etapa é a criação do arquivo .pro, que contém todos os trechos da adutora ou da rede que serão exibidos na janela das envoltórias após o cálculo do regime transiente pelo UFC 7. Estando todos os arquivos na mesma pasta (.inp, .rpt e .pro), é possível efetuar a sua leitura no UFC 7 para realizar o cálculo do regime transiente.

O UFC 8 é o módulo do Sistema UFC referente ao cálculo de redes de drenagem. Para isso, existe a integração entre o AutoCAD e o SWMM, software desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA, assim como o EPANET. Com esse módulo, é possível realizar a simulação hidrodinâmica das redes de drenagem. A Figura 38 ilustra os comandos do UFC 8.

Figura 38 – Comandos do UFC 8



Fonte: LAHC [s.d.].

O UFC 9 corresponde ao módulo do Sistema responsável pelo traçado e dimensionamento de Redes de Esgoto e Estações Elevatórias de Esgoto. Suas ferramentas podem ser visualizadas na Figura 39.

Figura 39 – Comandos do UFC 9

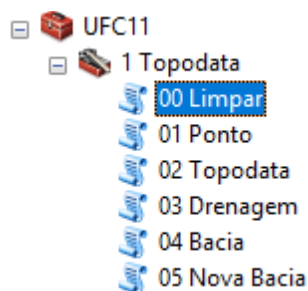


Fonte: LAHC [s.d.].

O UFC 10 é o módulo responsável pela calibração da rugosidade de Darcy-Weisbach e dos coeficientes dos modelos de simulação do decaimento do teor de cloro e outros compostos químicos em redes de distribuição de água.

O UFC 11 é o módulo do sistema que possui integração com o ArcGIS e possibilita ao usuário a automatização de tarefas como traçado de bacias e talvegues, obtendo como resultado arquivos nos formatos shapefile ou raster. A Figura 40 apresenta as ferramentas existentes do UFC 11 juntamente ao ArcGIS.

Figura 40 – Ferramentas do UFC 11



Fonte: LAHC [s.d.].

O UFC 12 é o componente responsável pela otimização do custo energético de estações elevatórias de água, construído na linguagem Free Pascal Lazarus. Dessa forma, não necessita de instalador.

O UFC 14 é o componente recentemente desenvolvido no Sistema UFC responsável pelo traçado de redes de água e adutoras, possibilitando a setorização das redes de distribuição de água.

Por fim, o módulo do sistema denominado UFC-FLOW refere-se ao cálculo de problemas que envolvem a área de estudo da Hidrogeologia. Os problemas comumente solucionados pelo software são: rebaixamento de aquífero confinado causado pelo bombeamento constante de um poço; sistema de um aquífero com rio; problema de influxo de água em um fosso de escavação; escoamento através da fundação de uma barragem de concreto; escoamento através da seção transversal de uma barragem de terra; e calibração de parâmetros envolvidos no cálculo de parâmetros hidrogeológicos (LAHC, [s.d.]).

2.6. Síntese do Referencial Teórico e bases para a modelagem do TAEB

Foi apresentado, portanto, o arcabouço teórico para a compreensão do fenômeno transitório, assim como a determinação da vazão e da carga piezométrica nas seções computacionais de interesse em adutoras sujeitas a variações rápidas de regime, inclusive com a incorporação de modelos de cavitação na análise. Também foram demonstrados os principais

dispositivos de proteção contra o transiente adotados em projetos de Engenharia e foi apresentada a visão geral de como o Sistema UFC funciona, em especial os módulos 2, 5 e 7, que são os utilizados para a modelagem numérica do transitório hidráulico.

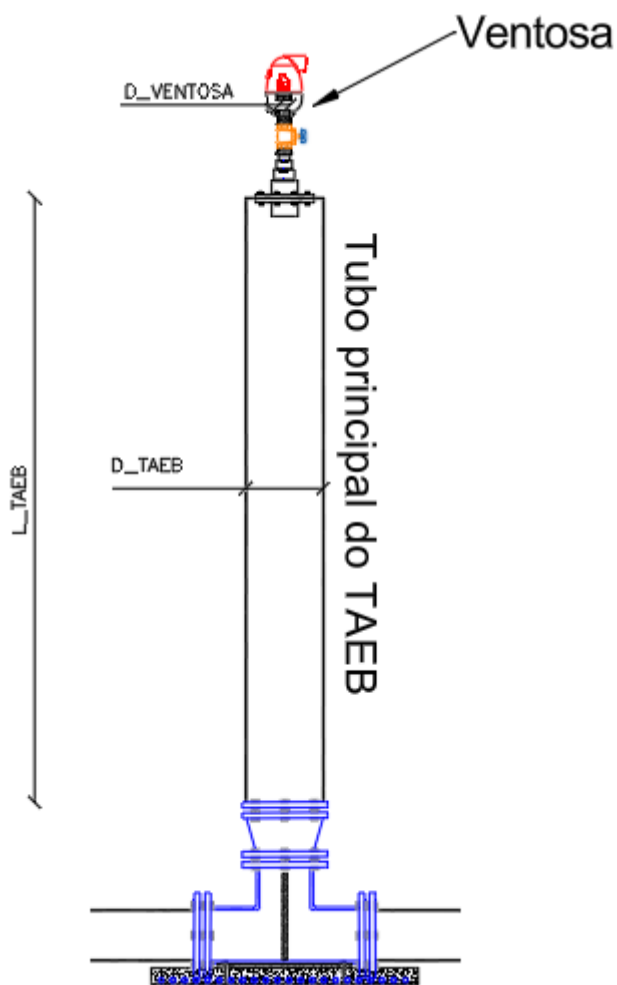
O TAEB, diferentemente dos outros dispositivos, não é modelado na literatura clássica e se trata de um dispositivo híbrido que combina os modelos da Chaminé de Equilíbrio e da Ventosa. É pertinente pontuar que, durante o funcionamento do TAEB, há a presença simultânea de um volume variável de água e um volume móvel de ar, ambos oscilando conforme a pressão que atua no ponto onde ele está instalado e a admissão ou expulsão de ar promovida pela Ventosa instalada no topo da sua estrutura. A pressurização ou a depressurização da coluna líquida presente na estrutura do TAEB são fortemente influenciadas pela admissão e expulsão controlada do ar, o que também influencia a frequência, a amplitude e o amortecimento das ondas de pressão geradas pelo transiente hidráulico.

Portanto, o presente capítulo estabelece a base teórica essencial, mas evidencia também lacunas nos modelos tradicionais de proteção contra transientes que motivam a formulação de um modelo específico para o TAEB. Esse novo modelo deve considerar a interação entre a coluna líquida e o volume de ar do dispositivo, bem como os efeitos da Ventosa na modulação da pressão interna, aspectos que serão detalhados no capítulo seguinte.

3. METODOLOGIA

A modelagem proposta neste trabalho considerou a compatibilização entre os modelos de Chaminé de Equilíbrio e Ventosa, também fazendo uso do modelo de cavitação para o cálculo do transiente nas adutoras simuladas. Esquematicamente, o TAEB está representado na Figura 41.

Figura 41 – Representação esquemática do TAEB com as variáveis de entrada para o cálculo



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O modelo numérico da Chaminé de Equilíbrio foi adaptado para considerar uma limitação de altura, que corresponde exatamente à altura em que o TAEB foi construído. No caso da Chaminé de Equilíbrio, essa altura pode, teoricamente, oscilar de maneira ilimitada, pois nesse dispositivo atua a pressão atmosférica. No TAEB, essa variação é controlada tanto pela altura construtiva do dispositivo como pela admissão ou expulsão de ar promovidas pela Ventosa instalada na sua extremidade superior.

Para realizar a modelagem, foi adotado o modelo com as equações da Ventosa propostas por Chaudhry (2014) apud Barbosa (2015) e foi adaptado o modelo da Chaminé de Equilíbrio propostas por Lessa (1984) e citado nos trabalhos de Barbosa (2006) e Ferreira (2011). De modo a aproximar ainda mais os resultados às medições efetuadas em campo, também foi adotada a consideração de variação de ar na adutora, ou seja, o modelo de cavitação desenvolvido por Paiva (2023). Todas essas equações, combinadamente, formam o modelo para o cálculo do transiente hidráulico com o amortecimento promovido pelo TAEB.

Para validar o modelo, foi realizada uma comparação entre a simulação realizada na Adutora da Fazenda Santa Maria, construída no município de Presidente Olegário, em Minas Gerais, e o resultado obtido no UFC 7. O dado medido em campo correspondeu à variação da altura do nível de água no TAEB, e foram realizados ajustes no UFC 7 de tal forma a reproduzir o mesmo comportamento observado em campo.

3.1. Modelagem do Transitório Hidráulico

Na simulação necessária para a inserção do TAEB, a adutora é calculada a partir do processo envolvendo primeiramente o UFC 2. Assim, é gerado o arquivo na extensão .inp da adutora e, para o cálculo do regime permanente, é utilizado o software EPANET. Com esse cálculo realizado, realiza-se a exportação do relatório completo do EPANET, que corresponde ao arquivo na extensão .rpt.

Além disso, é necessária a criação do arquivo .pro, que representa os trechos da adutora cujos resultados de envoltórias máximas e mínimas provenientes do cálculo do regime transiente são exibidos na tela do UFC 7. Destaca-se que o UFC 7 calcula o transitório em todos os nós da adutora, porém a exibição das envoltórias é efetuada apenas para os trechos presentes no arquivo .pro. Na representação em perfil da adutora no software, os trechos do arquivo .pro são exibidos na cor vermelha, enquanto que os demais trechos, na cor preta.

Para que o UFC 7 funcione corretamente, é necessário que todos esses arquivos mencionados estejam na mesma pasta. Ao abrir o arquivo .inp no UFC 7, parte-se para o cálculo do regime transiente, adotando-se o MOC ou o MOC Cavitação como modelo.

Os valores de vazão e cota piezométrica de cada seção provenientes do cálculo do regime permanente, obtidos a partir da leitura do arquivo .rpt, são os valores iniciais considerados para o cálculo do transiente. Neste trabalho, o regime transiente foi analisado durante um intervalo fixo de tempo, independente do seu completo amortecimento e retorno ao estado permanente, de forma a averiguar o comportamento da subpressão e da sobrepressão

para os casos analisados. O MOC e o MOC Cavitação, então, retornaram valores de cota piezométrica e vazão a cada passo de tempo para cada seção computacional desejada. A estabilidade numérica do modelo computacional do UFC 7 depende do cálculo do número de Courant, sendo que o próprio sistema consegue determinar as discretizações temporal e espacial de tal forma a atender a esse critério.

Após o cálculo do regime transitório sem dispositivos de alívio, partiu-se para a simulação com a introdução do TAEB. O modelo considera que, no regime permanente, toda a adutora, inclusive o TAEB, está preenchida por água. À medida que ocorre o transitório hidráulico a partir do desligamento da bomba, a Ventosa atua admitindo ou expulsando ar conforme a pressão no ponto onde ela está instalada. No ponto onde o TAEB está instalado, espera-se que ele contribua para a elevação da envoltória de pressões mínimas.

Nos tópicos a seguir, estão detalhados cada um dos modelos adotados neste trabalho.

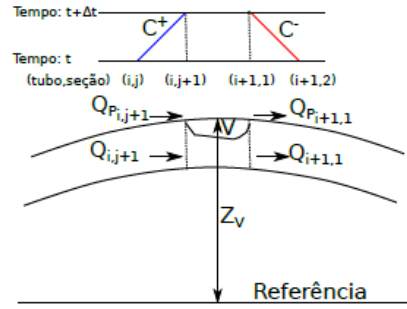
3.2. Modelagem da Ventosa

O modelo da Ventosa parte dos seguintes pressupostos:

1. Ar entra e sai do tubo através da Ventosa, de acordo com a condição de fluxo isentrópico, ou seja, ocorre sem a variação de entropia, sendo simultaneamente adiabático (isolado de trocas de calor) e reversível;
2. A massa de ar dentro do tubo segue a lei isotérmica, ou seja, sem variação de temperatura;
3. O ar admitido para o tubo permanece próximo à válvula de onde será expulso;
4. A elevação da superfície do líquido permanece constante e o volume de ar é pequeno quando comparado ao volume de líquido no tubo.

A Ventosa é modelada conforme a Figura 42.

Figura 42 – Modelagem da Ventosa segundo Chaudhry (2014)



Fonte: Barbosa (2015).

O comportamento da Ventosa é dividido em quatro zonas de atuação e a modelagem dessas zonas é representada pelas Equações (92), (93), (94) e (95):

1. Zona 1: entrada de ar em regime subsônico

$$\dot{m} = C_{adm} \cdot A_{adm} \cdot \sqrt{7 \cdot P_0 \cdot \rho_0 \cdot \left[\left(\frac{P}{P_0} \right)^{1,4286} - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{1,714} \right]} \rightarrow P_0 > P > 0,528 \cdot P_0 \quad (92)$$

2. Zona 2: entrada de ar em regime crítico

$$\dot{m} = C_{adm} \cdot A_{adm} \cdot \frac{0,686}{\sqrt{R \cdot T_0}} \cdot P_0 \rightarrow P \leq 0,528 \cdot P_0 \quad (93)$$

3. Zona 3: saída de ar em regime subsônico

$$\dot{m} = -C_{exp} \cdot A_{exp} \cdot \sqrt{\frac{7}{R \cdot T_i} \cdot \left[\left(\frac{P_0}{P} \right)^{1,4286} - \left(\frac{P_0}{P} \right)^{1,714} \right]} \rightarrow \frac{P_0}{0,528} > P > P_0 \quad (94)$$

4. Zona 4: saída de ar em regime crítico

$$\dot{m} = -C_{exp} \cdot A_{exp} \cdot \frac{0,686 \cdot P}{\sqrt{R \cdot T_i}} \rightarrow P > \frac{P_0}{0,528} \quad (95)$$

Sendo $\dot{m}$ a vazão mássica para entrada/saída de ar [$M \cdot T^{-1}$]; C_{adm} o coeficiente de descarga da Ventosa para entrada de ar [-]; A_{adm} a área do orifício da Ventosa para entrada de ar [L^2]; C_{exp} o coeficiente de descarga da Ventosa para saída de ar [-]; A_{exp} a área do orifício da Ventosa para saída de ar [L^2]; P_0 a pressão atmosférica fora da tubulação [$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$]; T_0 a temperatura externa à tubulação [θ]; ρ_0 a massa específica do ar na pressão atmosférica [$M \cdot L^{-3}$]; P a pressão absoluta dentro da tubulação [$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$]; T_i a temperatura interna da tubulação [θ] e R a constante do gás [$M \cdot L^2 \cdot T^{-2} \cdot \theta^{-1} \cdot n^{-1}$].

A equação dos gases ideais é escrita como a Equação (96):

$$(m_0 + \dot{m} \cdot \Delta t) \cdot R \cdot T_i = P \cdot V_C \quad (96)$$

Sendo m_0 a massa no início do intervalo de tempo [M]; Δt o passo de tempo [T] e V_C o volume da cavidade no final do passo de tempo [L^3].

No modelo de Chaudhry (2014), a equação para o volume de cavidade é escrita como a Equação (97):

$$V_C = V_i + 0,5 \cdot \Delta t \cdot \left[(Q_{P_{i+1,1}} + Q_{i+1,1}) - (Q_{P_{i,j+1}} + Q_{i,j+1}) \right] \quad (97)$$

Sendo V_i o volume da cavidade no início do passo de tempo [L^3]; $Q_{P_{i+1,1}}$, $Q_{P_{i,j+1}}$ as vazões no passo de tempo atual do tubo [$L^3 T^{-1}$], nas seções $i + 1, 1$ (a jusante da Ventosa) e $i, j + 1$ (a montante da Ventosa), respectivamente; $Q_{i+1,1}$, $Q_{i,j+1}$ as vazões no passo de tempo anterior do tubo [$L^3 T^{-1}$], nas seções $i + 1, 1$ (a jusante da Ventosa) e $i, j + 1$ (a montante da Ventosa), respectivamente.

Ao substituir as equações características positiva e negativa, obtém-se a Equação (98):

$$V_C = C_{air} + 0,5 \cdot \Delta t \cdot (C_{ap} + C_{an}) \cdot H_P \quad (98)$$

Sendo C_a o coeficiente do modelo de transiente de Chaudhry (2014) calculado como $g \cdot A/a$, sendo g a aceleração da gravidade [$L T^{-2}$], A a área da seção transversal do tubo [L^2] e a a celeridade da onda gerada pelo transiente [$L T^{-1}$]; C_{ap} o coeficiente C_a de Chaudhry para a seção a montante da Ventosa [$L^2 T^{-1}$]; C_{an} o coeficiente C_a de Chaudhry para a seção a jusante da Ventosa [$L^2 T^{-1}$] e H_P a carga piezométrica no passo de tempo atual [L].

C_{air} é um coeficiente determinado pela Equação (99):

$$C_{air} = V_i + 0,5 \cdot \Delta t \cdot (C_N + Q_{i+1,1} - C_P - Q_{i,j+1}) \quad (99)$$

Onde C_N e C_P são coeficientes do modelo de transiente de Chaudhry.

Substituindo o volume de cavidade na equação dos gases ideais, escreve-se a Equação (100):

$$(m_0 + \dot{m} \cdot \Delta t) \cdot R \cdot T_i = P \cdot \left[C_{air} + 0,5 \cdot \Delta t \cdot (C_{ap} + C_{an}) \cdot \left(\frac{P}{\gamma} + z - H_{BAR} \right) \right] \quad (100)$$

Reduzindo a equação anterior, obtém-se a Equação (101):

$$M_P \cdot R \cdot T = C_{air} \cdot P + \frac{K_1}{\gamma} \cdot P^2 + K_1 \cdot z \cdot P - K_1 \cdot H_{BAR} \cdot P \quad (101)$$

Sendo z a altura geométrica do ponto onde a Ventosa está instalada [L] e γ o peso específico do ar [$M L^{-2} T^{-2}$].

M_P e K_1 são dois coeficientes dados pelas Equações (102) e (103):

$$M_P = m_0 + \dot{m} \cdot \Delta t \quad (102)$$

$$K_1 = 0,5 \cdot \Delta t \cdot (C_{a_p} + C_{a_n}) \quad (103)$$

Organizando, obtém-se a Equação (104):

$$M_P K_2 = P'^2 + K_3 \cdot P' \quad (104)$$

Sendo os coeficientes da equação anterior dados pelas Equações (105), (106) e (107):

$$P' = \frac{P}{P_0} \quad (105)$$

$$K_2 = \frac{R \cdot T \cdot \gamma}{K_1 \cdot P_0^2} \quad (106)$$

$$K_3 = \frac{C_{air} \cdot \gamma}{K_1 \cdot P_0} + \frac{\gamma \cdot Z}{P_0} - \frac{\gamma \cdot H_{BAR}}{P_0} \quad (107)$$

A Equação (104) é resolvida numericamente pelo método da bisseção.

O modelo da Ventosa apresenta as seguintes limitações:

1. O modelo assume que o ar admitido pela Ventosa fica bem próximo à região onde ele foi admitido, o que acaba se tornando uma limitação, pois o fluxo da água pode arrastar as bolhas de ar ao longo da tubulação, modificando a dinâmica do sistema;
2. O modelo simplifica as trocas de calor do sistema, assumindo que o fluxo de admissão de ar é isentrópico e os processos de expansão e contração do ar são isotérmicos. Assim, trocas de calor mais complexas que podem ocorrer durante o transiente são ignoradas no modelo. Em contrapartida, segundo Fuertes-Miquel *et al.* (2016), o tempo necessário para que o ar atravessasse as Ventosas é muito curto para que possibilite trocas de calor significantes. Portanto, nos casos práticos envolvendo transientes utilizando Ventosas como mecanismo de proteção, as trocas de calor são irrelevantes para a dinâmica do sistema.

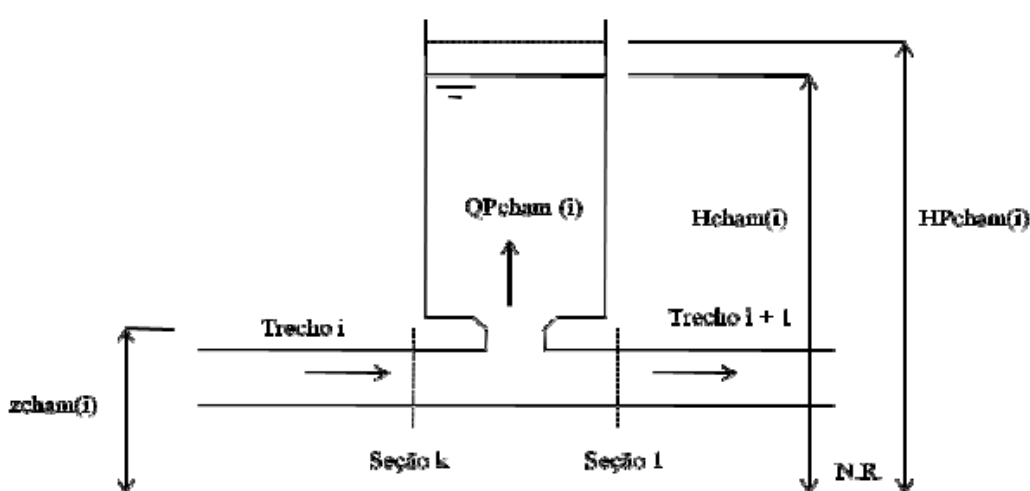
3.3. Modelagem da Chaminé de Equilíbrio considerando limitação de altura

A condição de contorno para a Chaminé de Equilíbrio adotada neste trabalho é aquela proposta por Lessa (1984) e citada nos trabalhos de Barbosa (2006) e Ferreira (2011). O

modelo apresenta como premissa a utilização do modelo da coluna rígida para a análise do transiente entre o reservatório alimentador do sistema, a Chaminé e o conduto que liga esses dois acessórios, uma vez que normalmente a Chaminé de Equilíbrio é posicionada próximo ao reservatório alimentador do sistema. Assim, assume-se que o fluido é incompressível e a tubulação indeformável, descrevendo uma oscilação de massa sob essas circunstâncias. A utilização do modelo da coluna rígida é razoável porque o conduto que liga os dois acessórios não sofre grandes pressões. Para incluir o restante do sistema hidráulico na análise do transitório, faz-se uso do modelo da coluna elástica, que retrata transientes rápidos e de pequena duração.

A Chaminé de Equilíbrio é modelada variando-se o nível de água no início e no final do passo de tempo. Também é levada em consideração a cota da base da Chaminé. Ademais, considera-se a vazão que entra ou sai da Chaminé. Durante a ocorrência de um evento transiente, o nível de água da Chaminé de Equilíbrio oscila, e essa oscilação é o que amortece as ondas de pressão presentes na tubulação da adutora. A formulação matemática da Chaminé de Equilíbrio é realizada utilizando-se leis da Mecânica dos Fluidos e Métodos Numéricos (FERREIRA, 2011). O sistema é modelado considerando o fluido contido na extensão da Chaminé de Equilíbrio, cuja representação esquemática, com as variáveis adotadas no modelo, está na Figura 43.

Figura 43 – Modelo da Chaminé de Equilíbrio



Fonte: Ferreira (2011).

A Segunda Lei de Newton pode ser aplicada para o movimento oscilatório da água na Chaminé. De acordo com essa Lei, é possível escrever a Equação (108):

$$\sum F = m \cdot a^* \quad (108)$$

Sendo $\sum F$ o somatório das forças que atuam no movimento da água na Chaminé [$M L T^{-2}$]; m a massa do fluido contido na extensão da Chaminé [M] e a^* a aceleração do movimento [$L T^{-2}$].

As forças que atuam nesse sistema são: peso, força de atrito localizado, força de atrito distribuído e força devido à pressão na base da Chaminé. As contribuições de cada uma dessas forças podem ser escritas como:

- Peso, formulado pela Equação (109):

$$W = \gamma_F \cdot A_{cham}(i) \cdot [HP_{cham}(i) - z_{cham}(i)] \quad (109)$$

Sendo W o peso da massa de fluido [$M L T^{-2}$]; γ_F o peso específico do fluido [$M L^{-2} T^{-2}$]; $A_{cham}(i)$ é a área da seção transversal da Chaminé de Equilíbrio do trecho i [L^2]; $HP_{cham}(i)$ o nível da água da Chaminé de Equilíbrio do trecho i no passo de tempo atual [L] e $z_{cham}(i)$ é a cota da base da Chaminé de Equilíbrio no trecho i [L].

- Força de atrito distribuído, formulada pela Equação (110):

$$FAD = \frac{\gamma_F \cdot A_{cham}(i) \cdot F_{cham}(i) \cdot [H_{cham}(i) - z_{cham}(i)]}{2g \cdot D_{cham}(i) \cdot (A_{cham}(i))^2} \cdot Q_{cham}(i) \cdot |Q_{cham}(i)| \quad (110)$$

Sendo FAD a força de atrito distribuído aplicado à massa de fluido [$M L T^{-2}$]; $F_{cham}(i)$ o fator de atrito das paredes da Chaminé de Equilíbrio no trecho i [-]; $H_{cham}(i)$ o nível da água da Chaminé de Equilíbrio do trecho i no passo de tempo anterior [L]; $D_{cham}(i)$ o diâmetro da Chaminé de Equilíbrio no trecho i [L] e $Q_{cham}(i)$ a vazão que entra ou sai da Chaminé de Equilíbrio no trecho i no passo de tempo anterior [$L^3 T^{-1}$].

- Força de atrito localizado, formulada pela Equação (111):

$$FAL = \frac{\gamma_F \cdot A_{cham}(i) \cdot K_p(i)}{(AO_{cham}(i))^2} \cdot Q_{cham}(i) \cdot |Q_{cham}(i)| \quad (111)$$

Sendo FAL a força de atrito localizado aplicado à massa de fluido [$M L T^{-2}$]; $K_p(i)$ o coeficiente de perda localizada no orifício da Chaminé de Equilíbrio no trecho i [-] e $AO_{cham}(i)$ a área do orifício da Chaminé de Equilíbrio do trecho i [L^2], obtida a partir da área da tubulação de ligação, cujo diâmetro é designado por D_{lig} .

- Força de pressão na base da Chaminé, formulada pela Equação (112):

$$FP = \gamma_F \cdot A_{cham}(i) \cdot (HP(i, k) - z_{cham}(i)) \quad (112)$$

Sendo FP a força devido à pressão na base da Chaminé $[M L T^{-2}]$ e $HP(i, k)$ a cota piezométrica no trecho i , seção k , no passo de tempo atual $[L]$.

A massa e a aceleração são formuladas pelas Equações (113) e (114):

$$m = \frac{\gamma_F \cdot A_{cham}(i) \cdot (HP(i, k) - z_{cham}(i))}{g} \quad (113)$$

$$a^* = \frac{QP_{cham}(i) - Q_{cham}(i)}{A_{cham}(i) \cdot \Delta t} \quad (114)$$

Onde $QP_{cham}(i)$ é a vazão que entra ou sai da Chaminé de Equilíbrio no trecho i no passo de tempo atual $[L^3 T^{-1}]$.

Realizando manipulações algébricas com as Equações (109) a (114), a vazão que entra ou sai da Chaminé é calculada pela Equação (115):

$$QP_{cham}(i) = Q_{cham}(i) + B_2 \cdot (HP(i, k) - H_{cham}(i) - B_1) \quad (115)$$

B_1 e B_2 são coeficientes dados pelas Equações (116) e (117):

$$B_1 = \frac{F_{cham}(i) \cdot (H_{cham}(i) - z_{cham}(i))}{2g \left[D_{cham}(i) \cdot (A_{cham}(i))^2 + \frac{K_p(i)}{(AO_{cham}(i))^2} \right]} \cdot Q_{cham}(i) \cdot |Q_{cham}(i)| \quad (116)$$

$$B_2 = \frac{g \cdot A_{cham}(i) \cdot \Delta t}{H_{cham}(i) - z_{cham}(i)} \quad (117)$$

A equação que relaciona carga e vazão da Chaminé de Equilíbrio é dada pela Equação (118):

$$HP_{cham}(i) = H_{cham}(i) + \frac{0,5 \cdot \Delta t \cdot (QP_{cham}(i) + Q_{cham}(i))}{A_{cham}(i)} \quad (118)$$

A equação da continuidade é formulada nos termos da Equação (119):

$$QP(i, k) = QP_{cham}(i) + QP(j, 1) \quad (119)$$

Sendo $QP(i, k)$ a vazão no trecho i , seção k , no passo de tempo atual $[L^3 T^{-1}]$ e $QP(j, 1)$ a vazão no trecho j , seção 1, no passo de tempo atual $[L^3 T^{-1}]$.

Considerando não haver perdas de carga entre as duas seções da Chaminé, incorpora-se ao modelo a Equação (120):

$$HP(i, k) = HP(j, 1) \quad (120)$$

Sendo $HP(j, 1)$ a cota piezométrica no trecho j , seção 1, no passo de tempo atual [L].

Também são válidas as equações características na Chaminé de Equilíbrio, reescritas na forma das Equações (121) e (122):

$$C^+: QP(i, k) = C_p(i, k) - C_a(i) \cdot HP(i, k) \quad (121)$$

$$C^-: QP(j, 1) = C_N(j, 1) - C_a(j) \cdot HP(j, 1) \quad (122)$$

Sendo $C_p(i, k)$ e $C_N(j, 1)$ os coeficientes de cálculo do modelo de Chaudhry (2014) para o trecho i , seção k e trecho j , seção 1, respectivamente [$L^3 T^{-1}$].

As Equações (115), (118), (119), (120), (121) e (122) formam um sistema linear, cujas incógnitas são $QP(i, k)$, $HP(i, k)$, $QP(j, 1)$, $HP(j, 1)$, $QP_{cham}(i)$ e $HP_{cham}(i)$. Isolando-se $HP_{cham}(i)$, obtém-se a Equação (123):

$$HP_{cham}(i) = \left(\frac{1}{1 + \frac{B_4 \cdot B_6 \cdot B_2}{B_2 \cdot B_6}} \right) \cdot \left[B_3 + B_4 \cdot B_5 - \left(\frac{B_4 \cdot B_6}{B_2 + B_6} \right) \cdot (B_5 + B_2 \cdot B_1 - Q_{cham}(i)) \right] \quad (123)$$

Sendo B_3 , B_4 , B_5 e B_6 são coeficientes dados pelas Equações (124), (125), (126) e (127):

$$B_3 = H_{cham}(i) + B_4 \cdot Q_{cham}(i) \quad (124)$$

$$B_4 = \frac{0,5 \cdot \Delta t}{A_{cham}(i)} \quad (125)$$

$$B_5 = C_p(i, k) - C_N(j, 1) \quad (126)$$

$$B_6 = C_a(i) + C_a(j) \quad (127)$$

Com a obtenção da variável $HP_{cham}(i)$ pela Equação (123), é possível obter as demais variáveis do problema pelas Equações (115), (119), (120), (121) e (122).

A variação da altura de água é no interior da Chaminé de Equilíbrio é dada pela Equação (128):

$$HP_{cham}(i) = H_{cham}(i) + \frac{\Delta t \cdot Q_{cham}(i)}{A_{cham}(i)} \quad (128)$$

Como limitação do modelo de Lessa (1984) para a Chaminé de Equilíbrio, pode-se citar que o modelo despreza o atrito e a inércia da coluna líquida quando o movimento da água ocorre a baixas velocidades e a Chaminé de Equilíbrio apresenta grandes dimensões. Assim, em situações com oscilações mais rápidas ou com Chaminés menores, o modelo deve ser ajustado para considerar esses termos.

Adicionalmente ao modelo, para o caso do TAEB, considerou-se que o nível da água está limitado à altura da tubulação que conecta a Ventosa à adutora. Assim, foi adotado o condicional dado pela Equação (129):

$$HP_{cham}(i) = \begin{cases} L_{TAEB}, & \text{se } HP_{cham}(i) \geq L_{TAEB} \\ H_{cham}(i) + \frac{\Delta t \cdot Q_{cham}}{A_{cham}}, & \text{se } HP_{cham}(i) < L_{TAEB} \end{cases} \quad (129)$$

Sendo L_{TAEB} o comprimento da estrutura do TAEB [L].

3.4. Compatibilização entre os Modelos

A compatibilização entre os modelos da Chaminé de Equilíbrio e a Ventosa foi o ponto fundamental para reproduzir os resultados encontrados em campo, assim como possibilitou a utilização do TAEB em quaisquer adutoras simuladas no UFC 7.

De forma a compatibilizar esses modelos, o primeiro passo foi a modificação da Equação (98), fornecendo a Equação (130):

$$V_c = C_{air} + 0,5 \cdot \Delta t \cdot (C_{ap} + C_{an}) \cdot \left[\frac{(QP_{cham}(i) - Q_{cham}(i))}{B_2} + H_{cham}(i) + B_1 \right] \quad (130)$$

Em seguida, na mesma classe do cálculo da Chaminé de Equilíbrio, foram criadas as zonas de atuação da Ventosa. Nessa classe, foram criadas as seguintes condições para a atuação da Ventosa em combinação com a Chaminé de Equilíbrio:

- Caso o volume de ar no dispositivo seja menor do que zero e a pressão absoluta (calculada como $\gamma \cdot (HP_{cham}(i) - z_{cham}(i) + H_{BAR})$) seja menor que $p_{atm} - 0,2 \cdot \gamma$, a zona 1 será ativada, correspondendo à admissão de ar no dispositivo;
- Caso a pressão absoluta seja maior que $p_{atm} - 0,2 \cdot \gamma$ e o volume de ar no dispositivo seja maior do que zero, será ativada a zona 3, correspondendo à expulsão normal de ar;

- Caso nenhuma dessas situações aconteça, ou seja, o volume de ar seja exatamente igual a zero, será ativada a zona 2 da Ventosa, que corresponde a uma zona de transição de operação;
- Por fim, reorganizando a Equação (95), se P/p_{atm} for maior do que 1,894, será ativada a zona 4 da Ventosa, corresponde à expulsão intensa de ar.

No caso da atuação da zona 3, foi criada uma rotina para determinar a variação do nível de água no TAEB. No início dessa rotina, foi determinada a Equação (131):

$$\Delta NA = NA_p - NA_{cham} \quad (131)$$

Sendo ΔNA a variação do nível da água no TAEB [L]; NA_p o nível de água no TAEB no passo de tempo atual [L] e NA_{cham} o nível de água no TAEB no início da simulação, valor inserido pelo usuário na interface do UFC 7 [L].

O nível de água no passo de tempo atual pode ser calculado pela Equação (132):

$$NA_p = NA + \frac{QP_{cham}(i) \cdot \Delta t}{A_{cham}(i)} \quad (132)$$

Sendo NA o nível de água no passo de tempo anterior [L].

No momento em que o usuário seleciona a Ventosa, escolhendo o tipo e o diâmetro, o sistema atribui um valor para o orifício cinético da Ventosa a partir do catálogo dos fabricantes do dispositivo presente na biblioteca do UFC 7.

Nessa zona, o volume de ar expulso pela Ventosa corresponde à Equação (133):

$$V_{exp} = \dot{m} \cdot \Delta t \quad (133)$$

Sendo V_{exp} o volume de ar expulso [L³]. A vazão mássica de ar é calculada conforme a Equação (94) e depende da área do orifício cinético da Ventosa.

Ao final dessa rotina, a variação do nível de água será determinada pela Equação (134):

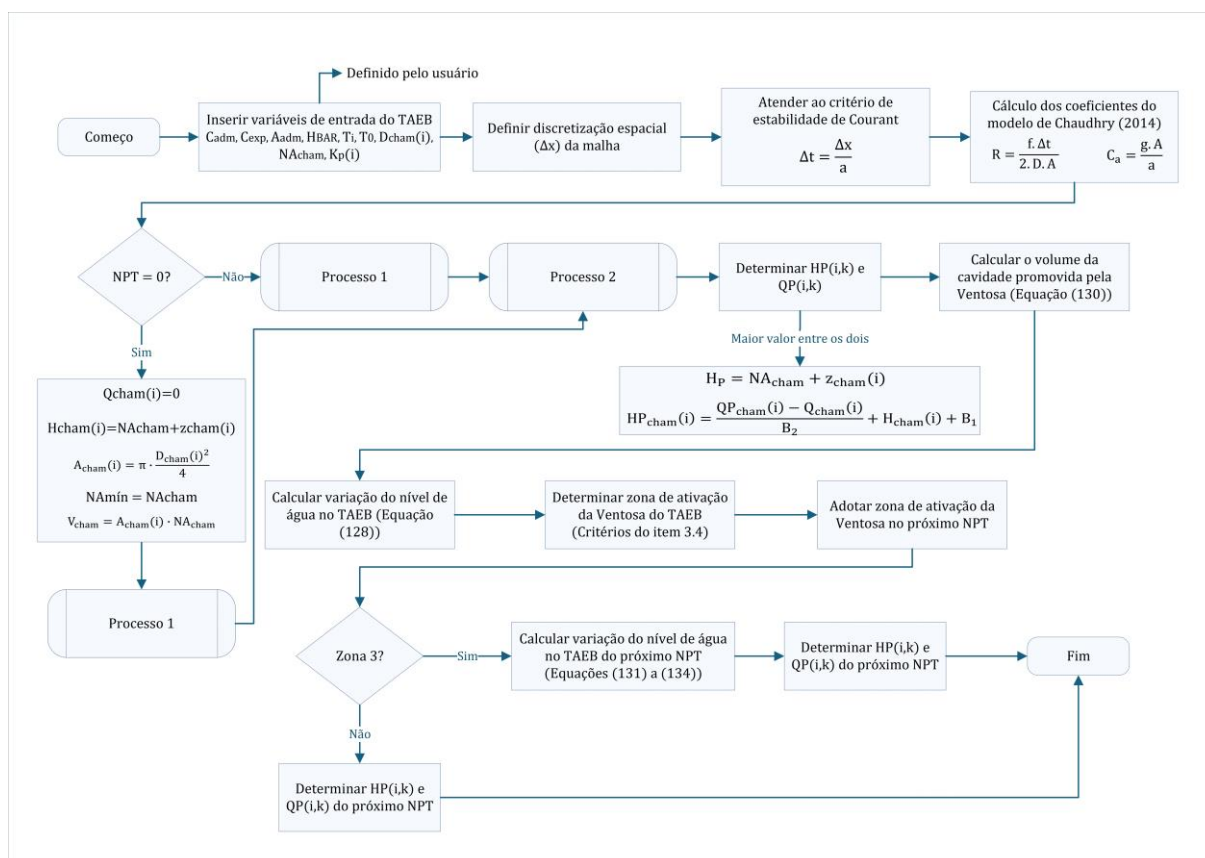
$$\Delta NA = \frac{V_{exp}}{A_{cham}(i)} \quad (134)$$

Assim, determinada a variação do nível de água no TAEB, é possível calcular o rebaixamento da água no dispositivo e, conseqüentemente, o quanto a envoltória de subpressão será elevada em relação ao nível do terreno no local onde o TAEB está instalado.

3.5. Fluxograma Metodológico

Para ilustrar a forma como o algoritmo desenvolvido funciona internamente no UFC 7, foi elaborado o fluxograma da Figura 44.

Figura 44 – Fluxograma de cálculo da condição de contorno do TAEB no UFC 7



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A estrutura do UFC 7 exige que cada condição de contorno inserida apresente alguns dados de entrada. No caso do TAEB, esses dados são divididos em dois grupos: as variáveis da Ventosa (C_{adm} , C_{exp} , A_{adm} , H_{BAR} , T_i e T_o) e as variáveis da Chaminé de Equilíbrio ($D_{cham}(i)$, NA_{cham} , D_{lig} e $K_p(i)$).

Assim, o cálculo se inicia a partir da inserção das variáveis de entrada do TAEB pelo usuário, por meio da interface gráfica do UFC 7. Em seguida, o algoritmo define a discretização espacial e o passo de tempo computacional para atender ao critério de estabilidade de Courant, uma vez que com os dados das tubulações da adutora testada, é possível calcular a celeridade da onda.

Posteriormente, são calculados os coeficientes de cálculo do transiente de Chaudhry (2014), que dependem dos dados do regime permanente. Após isso, caso o NPT (número do passo de tempo) seja zero, o algoritmo faz considerações e cálculos de algumas variáveis, conforme pode ser observado na Figura 44, e realiza o Processo 1, que corresponde às equações da Ventosa (item 3.2) e, logo após, realiza o Processo 2, que são as equações da Chaminé de Equilíbrio (item 3.3). Se o NPT for maior que zero, o algoritmo já pula a etapa dos cálculos e considerações iniciais e realiza os Processos 1 e 2 sequencialmente. Considerou-se, ainda, que quando $NPT = 0$, a Ventosa está fechada e a estrutura do corpo do TAEB está completamente preenchida por água.

O próximo passo é atribuir um valor para $HP(i, k)$, que é o maior entre os dois obtidos pelas Equações (135) e (136):

$$H_p = NA_{cham} + z_{cham}(i) \quad (135)$$

$$HP_{cham}(i) = \frac{QP_{cham}(i) - Q_{cham}(i)}{B_2} + H_{cham}(i) + B_1 \quad (136)$$

Parte-se, assim, para o cálculo da cavidade promovida pela Ventosa, ou seja, a Equação (130), e depois para a variação do nível de água no TAEB, que é a Equação (128). Então, a zona de ativação da Ventosa é determinada, levando em consideração os critérios estabelecidos no item 3.4. Assim, essa zona de ativação é adotada no próximo NPT do cálculo. Caso seja a zona 3, calcula-se novamente a variação do nível de água, adotando-se as Equações (131), (132), (133) e (134), determina-se $HP(i, k)$ do próximo NPT , considerando o maior valor entre (135) e (136), assim como $QP(i, k)$, determinado pela Equação (122). Caso a zona ativada não seja a 3, o algoritmo simplesmente determina $HP(i, k)$ e $QP(i, k)$ do próximo NPT .

3.6. Sistemas de Adução simulados

3.6.1. Adutora da Fazenda Santa Maria

O primeiro caso abordado neste trabalho tratou-se da simulação da Adutora da Fazenda Santa Maria utilizando o UFC 7, de modo a validar o modelo. Esta adutora foi construída em maio de 2023 e logo em seguida foi realizado o ensaio experimental considerando a parada do conjunto motobomba e a influência do TAEB na atenuação do golpe de aríete. Pelo fato de o material da adutora ser novo, dispensou-se o processo de calibração

dos parâmetros hidráulicos, como pressões e vazões, não sendo instalados medidores em sua extensão.

A cerca de 1,6 km do sistema elevatório, foi instalado o TAEB para a atenuação do golpe de ariete. Também foi instalado um tubo de acrílico, paralelo à estrutura principal do TAEB, de modo a verificar o comportamento do nível de água durante o regime transiente estabelecido. No Apêndice deste trabalho, há o registro fotográfico referente à instalação do TAEB.

O conjunto motobomba da Adutora da Fazenda Santa Maria apresenta os dados de entrada da Tabela 3, necessários ao cálculo do transiente.

Tabela 3 – Dados de entrada da Adutora da Fazenda Santa Maria

Dados de entrada	
Nº de bombas em paralelo	01
Comprimento total (m)	1.974,44
Vazão inicial (m³/s)	0,015
Nº de horas de funcionamento da bomba (h)	24
Desnível geométrico (m)	73,98
Rugosidade das tubulações (mm)	0,06
Rotação do rotor (rpm)	3.500,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Adutora da Fazenda Santa Maria possui 8 tipos de materiais diferentes ao longo de seu comprimento com a distribuição presente na Tabela 4.

Tabela 4 – Materiais presentes na Adutora da Fazenda Santa Maria

Material	Comprimento (m)	Pressão máxima admissível (mca)
FOFO FLANGEADO PN 10	1,00	200,00
PVC DEFOFO	2,00	100,00
PVC LF PN 40 PBL	368,16	40,00
PVC LF PN 60 PBL	441,51	60,00
PVC LF PN 80 PBL	153,34	80,00
PVC LF PN 125 PBL	702,53	125,00
PVC PN 60 DEFOFO	246,26	60,00
PVC PN 80 DEFOFO	59,64	80,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A adutora possui, também, os dados referentes às tubulações apresentadas na Tabela 5 e os referentes à simulação realizada no UFC 7 na Tabela 6, contendo os dados referentes às discretizações espacial e temporal para a simulação do transiente.

Tabela 5 – Dados acerca das tubulações da Adutora da Fazenda Santa Maria

Dados das tubulações								
Parâmetro	FOFO PN 10	PVC DEFOFO	PVC PN 40	PVC PN 60	PVC PN 80	PVC PN 125	PVC PN 60 DEFOFO	PVC PN 80 DEFOFO
Diâmetro interno (mm)	80	100	125	125	125	125	150	150
Espessura (mm)	6,00	4,80	2,50	3,40	4,20	5,00	3,90	4,20
Módulo de Elasticidade (GPa)	172,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Coefficiente de Poisson	0,28	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
Celeridade estimada (m/s)	1.355,06	364,61	266,24	310,94	346,05	361,77	285,33	303,26

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 6 – Dados da simulação da Adutora da Fazenda Santa Maria

Dados da simulação	
Duração da simulação (s)	60,00
Número de divisões do menor trecho	2
Densidade do fluido (kg/m ³)	997,00
Módulo de elasticidade volumétrica do fluido (Pa)	$2,19 \times 10^9$
Viscosidade cinemática (m ² /s)	$0,896 \times 10^{-6}$
Porcentagem inicial de ar (%)	$1,00 \times 10^{-4}$
Passo de tempo computacional (s)	0,00037
Discretização espacial (m)	0,50

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Assim, a adutora tem Diâmetro Nominal (DN) de 125 mm nos trechos constituídos de PVC, totalizando 1.665,54 m de comprimento. Os trechos formados por PVC DEFOFO apresentam DN de 150 mm e totalizam 305,90 m de extensão.

Para o TAEB instalado, foram considerados os dados apresentados na Tabela 7, utilizados para o cálculo do transiente pelo UFC 7. A Ventosa adotada foi da marca A.R.I., modelo D43 DN 2" (50 mm) dotada de dispositivo NS (Non-slam).

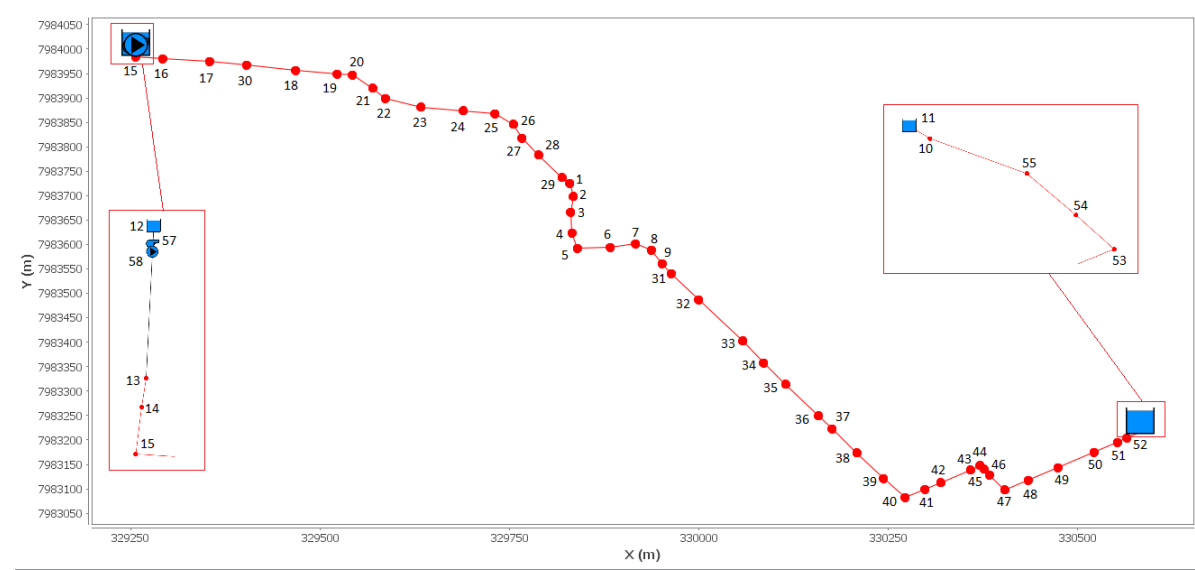
Tabela 7 – Dados do TAEB construído para a Adutora da Fazenda Santa Maria

Dados de entrada do TAEB	
Diâmetro (mm)	300
Comprimento (m)	3,0
Coefficiente de Perda Localizada	5,50
Diâmetro da Ventosa (mm)	50
Área do Orifício Cinético (mm²)	907,00
Coefficiente de Admissão de Ar	0,410
Coefficiente de Expulsão de Ar	0,990
Temperatura Interna (°C)	25,00
Temperatura Externa (°C)	24,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

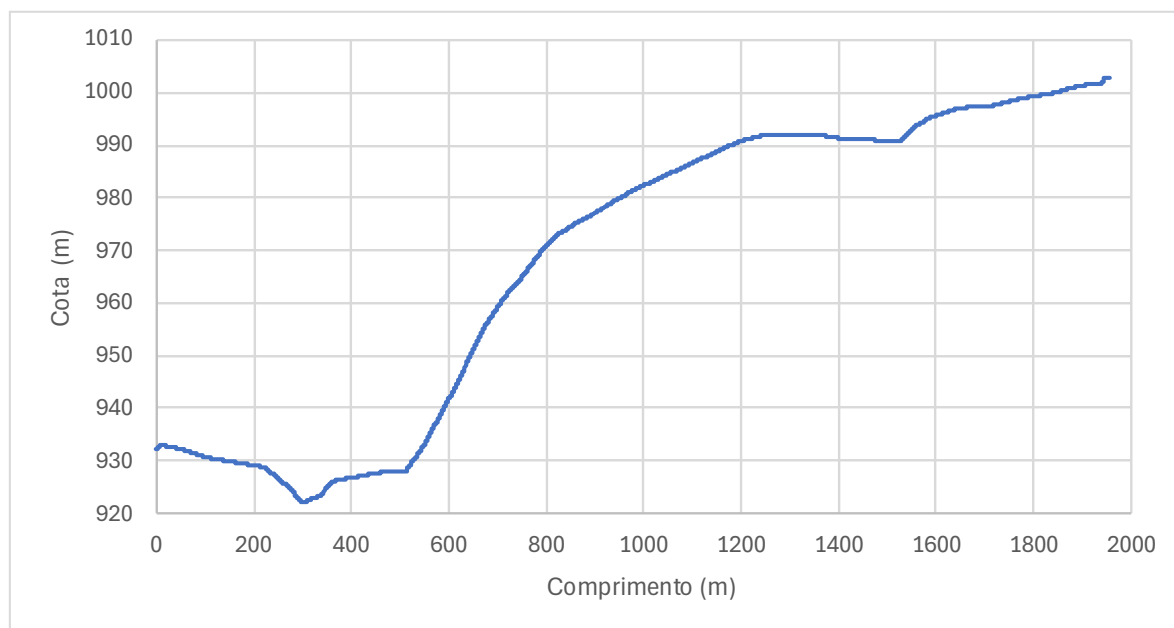
A adutora, em planta baixa, foi desenvolvida no AutoCAD para a posterior exportação para o UFC 7, cuja visualização está presente na Figura 45. A visualização da adutora em perfil está na Figura 46.

Figura 45 – Planta baixa da Adutora da Fazenda Santa Maria no UFC 7



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 46 – Perfil da Adutora da Fazenda Santa Maria

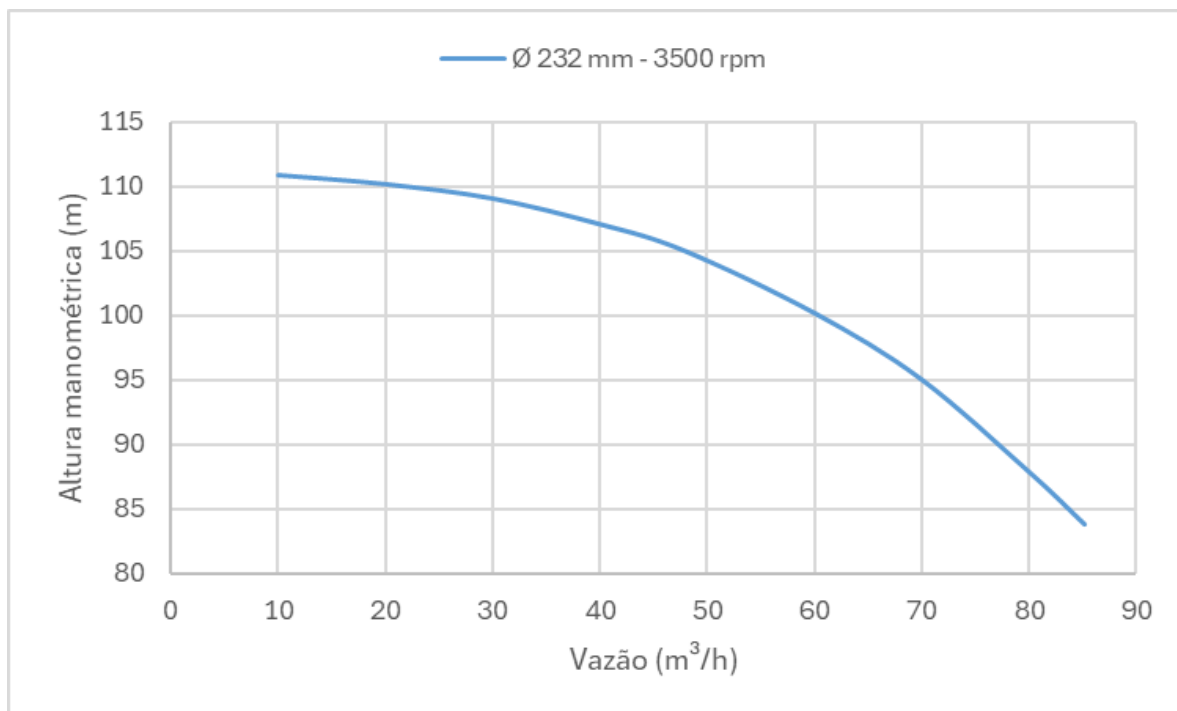


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Na Figura 45, devido à escala do desenho, para a representação dos nós do reservatório de montante até o início da tubulação principal da adutora (12, 57, 58, 13 e 14) e a chegada ao reservatório de jusante (53, 54, 55, 10 e 11), foram realizadas ampliações nesses dois segmentos. Os nós ao lado esquerdo representam o reservatório de montante (nó 12), o trecho de sucção (entre os nós 12 e 57), a bomba (nó 57), o trecho entre a bomba e a válvula de retenção (entre os nós 57 e 58), a válvula de retenção (nó 58) e os nós 13 e 14, que são trechos menores anteriores à tubulação principal da adutora (do nó 15 ao 52). Ao lado direito, há os nós 53, 54, 55, 10 e 11, sendo trechos menores antes da chegada até o reservatório de jusante (nó 11). Nessa adutora, o TAEB foi simulado no nó 45.

Além disso, a bomba utilizada na simulação tem a sua curva característica apresentada na Figura 47 e Tabela 8.

Figura 47 – Curva característica da bomba EBARA GSD 40-250 30CV



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 8 – Curva característica da bomba EBARA GSD 40-250 30CV

Vazão (m³/h)	Altura manométrica (m)
10,01	110,90
20,02	110,20
29,92	109,10
40,00	107,10
47,99	105,00
60,01	100,20
69,91	95,10
80,00	87,90
85,21	83,80

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.6.1.1. Procedimento de Validação e Análise de Sensibilidade

De tal forma a possibilitar a aplicação do modelo desenvolvido para o TAEB para outras adutoras no UFC 7, fez-se necessária a validação do modelo a partir do resultado obtido em campo no experimento da Adutora da Fazenda Santa Maria.

O teste realizado com o TAEB instalado na adutora foi gravado e o vídeo apresenta uma precisão de 19,84 quadros por segundo, cujo resumo está apresentado a seguir:

- A bomba é desligada e, em seguida, ocorre o rebaixamento do nível de água em torno de 95 cm, atingindo uma altura de 2,05 m;
- O rebaixamento do nível de água ocorre em aproximadamente 10 segundos;
- Nos próximos 8 segundos, ocorre a elevação do nível de água, mas o nível não retorna para a altura inicial do TAEB de maneira imediata;
- Nos próximos 32 segundos, ocorre a elevação do nível de água de modo a atingir o nível inicial de água do TAEB, ou seja, 3,00 m.

A validação foi realizada de tal forma a aproximar o máximo possível o resultado obtido pelo UFC 7 com os dados experimentais. Dessa forma, realizou-se a validação do modelo no UFC 7 por meio do ajuste dos parâmetros considerados mais influentes no rebaixamento do nível de água, até que os resultados das simulações apresentassem boa concordância com os dados experimentais obtidos. Para isso, foram testadas as seguintes variáveis: $K_p(i)$ (coeficiente de perda localizada no orifício do TAEB), ε_0 (porcentagem inicial de ar), C_{adm} (coeficiente de descarga da Ventosa para entrada de ar) e C_{exp} (coeficiente de descarga da Ventosa para saída de ar). Todos os resultados foram simulados utilizando-se o MOC Cavitação do UFC 7, que considera o modelo desenvolvido por Paiva (2023).

De forma a avaliar qual combinação de parâmetros trouxe o melhor resultado para o modelo, foi realizada a análise estatística comparando-se o dado medido em campo com o dado simulado pelo UFC 7. A análise estatística utilizou dois indicadores: erro quadrático médio (EQM) e coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), conforme os trabalhos de Martins *et al.* (2014) e Saemi *et al.* (2019), que são representados pelas Equações (137) e (138):

$$EQM = \frac{1}{n_o} \cdot \sum_{i=1}^{n_o} (y_o - y_s)^2 \quad (137)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_o} (y_o - y_s)^2}{\sum_{i=1}^{n_o} (y_o - \bar{y}_o)^2} \quad (138)$$

Sendo n_o o total de dados observados, y_o o valor observado, y_s o valor simulado e $\bar{y}_o$ a média dos valores observados. Quanto menor for o EQM e quanto mais próximo de 1 for o NSE, mais próximo é o resultado modelado dos dados coletados no experimento.

Após a validação do modelo, foram realizadas simulações em sistemas hidráulicos fictícios de modo a verificar a eficiência do TAEB no combate aos transientes hidráulicos. Os seguintes sistemas foram testados:

- Adutora de Aurora/CE;
- Adutora de Alcântara/MA.

De modo a demonstrar a abrangência da atuação do TAEB em relação às Ventosas, também foram demonstrados os resultados de envoltórias para os seguintes sistemas hidráulicos, ambos fictícios:

- Adutora de Acaraú/CE;
- Adutora do Loteamento Araripina/PE.

3.6.2. Adutora de Aurora/CE

A segunda situação simulada neste trabalho refere-se à adutora fictícia da cidade de Aurora/CE, composta quase que em sua totalidade por PVC PBA Classe 12 (pressão máxima admissível de 60 mca), com exceção de um trecho de 2,00 m constituído de PVC DEFOFO (pressão máxima admissível de 100 mca), referente à chegada da adutora ao reservatório de jusante.

A Tabela 9 apresenta os dados de entrada da adutora adotados na simulação do UFC

7.

Tabela 9 – Dados de entrada da Adutora de Aurora/CE

Dados de entrada	
Número de bombas em paralelo	04
Comprimento total (m)	379,04
Vazão inicial (m³/s)	0,00796
Nº de horas de funcionamento da bomba (h)	16
Desnível geométrico (m)	9,84
Rugosidade das tubulações (mm)	0,06
Rotação do rotor (rpm)	1.750,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A adutora apresenta distribuição de diâmetros de acordo com a Tabela 10.

Tabela 10 – Distribuição de diâmetros na Adutora de Aurora/CE

Diâmetro Nominal (mm)	Comprimento (m)
50	365,04
75	12,00
100	2,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A adutora possui os dados acerca de suas tubulações na Tabela 11 e os dados da simulação do UFC 7 na Tabela 12, que apresenta as discretizações espacial e temporal adotadas para o atendimento ao critério de estabilidade de Courant.

Tabela 11 – Dados acerca das tubulações da Adutora de Aurora/CE

Dados das tubulações			
Parâmetro	PVC PBA 12	PVC PBA 12	PVC DEFOFO
Diâmetro interno (mm)	50	75	100
Espessura (mm)	2,70	3,90	4,80
Módulo de Elasticidade (GPa)	3,00	3,00	3,00
Coefficiente de Poisson	0,38	0,38	0,38
Celeridade estimada (m/s)	381,58	385,44	479,61

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

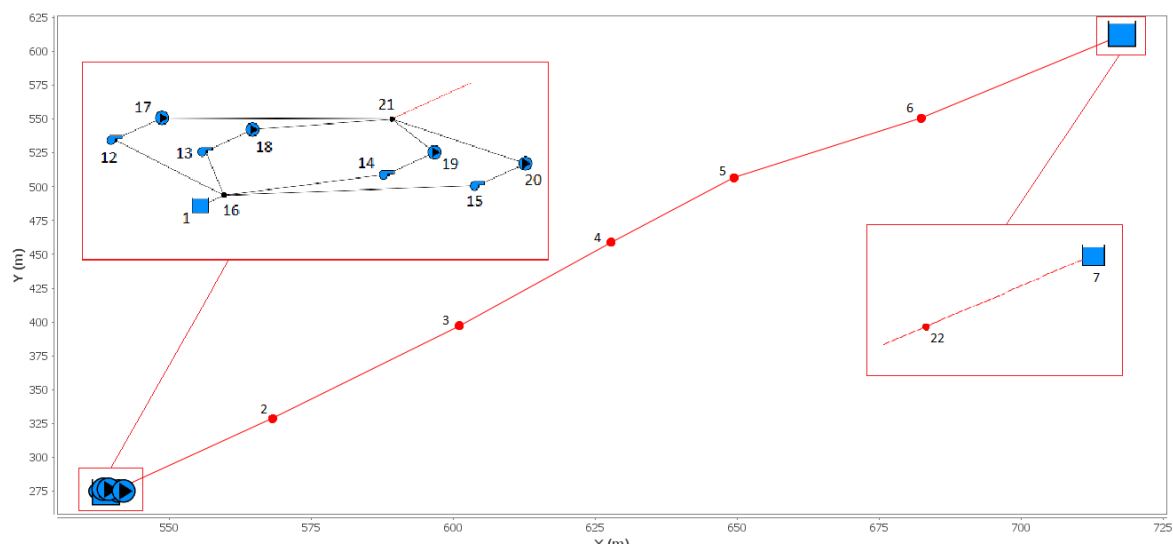
Tabela 12 – Dados da simulação da Adutora de Aurora/CE

Dados da simulação	
Duração da simulação (s)	60,00
Número de divisões do menor trecho	2
Densidade do fluido (kg/m ³)	997,00
Módulo de elasticidade volumétrica do fluido (Pa)	$2,19 \times 10^9$
Viscosidade cinemática (m ² /s)	$0,896 \times 10^{-6}$
Porcentagem inicial de ar (%)	$1,00 \times 10^{-4}$
Passo de tempo computacional (s)	0,00086
Discretização espacial (m)	0,50

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

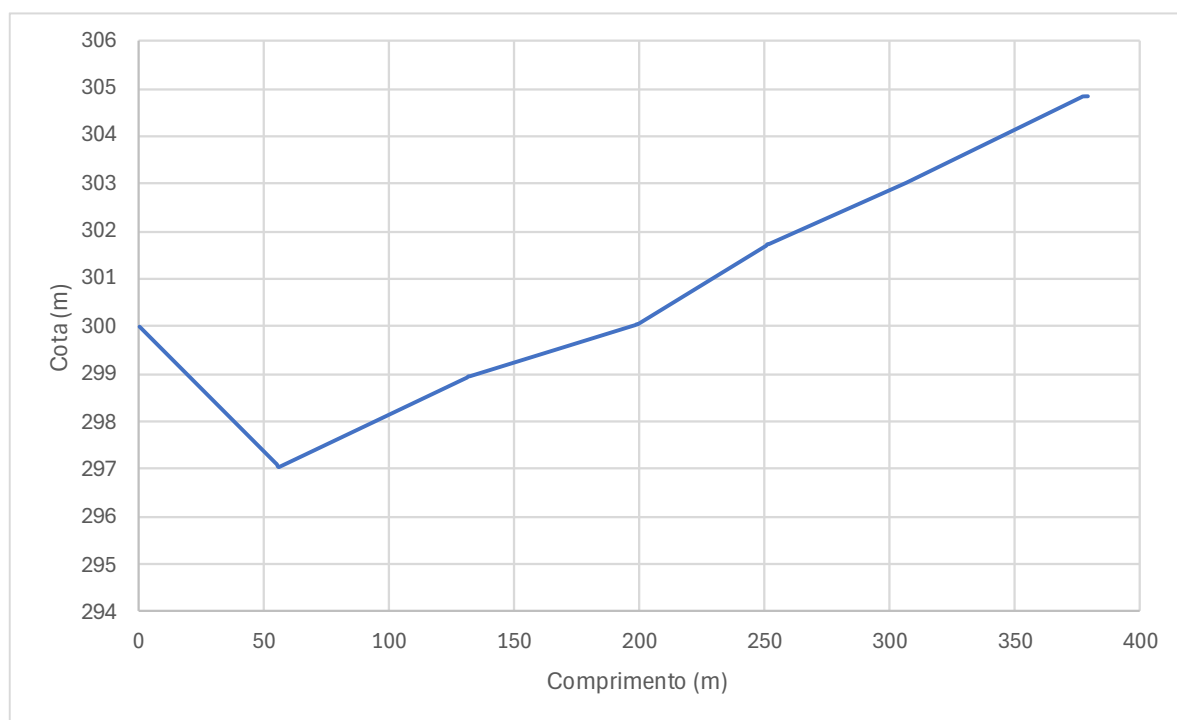
Em planta baixa no UFC 7, o sistema está na Figura 48, enquanto que em perfil, na Figura 49.

Figura 48 – Planta baixa da Adutora de Aurora/CE no UFC 7



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 49 – Perfil da Adutora de Aurora/CE

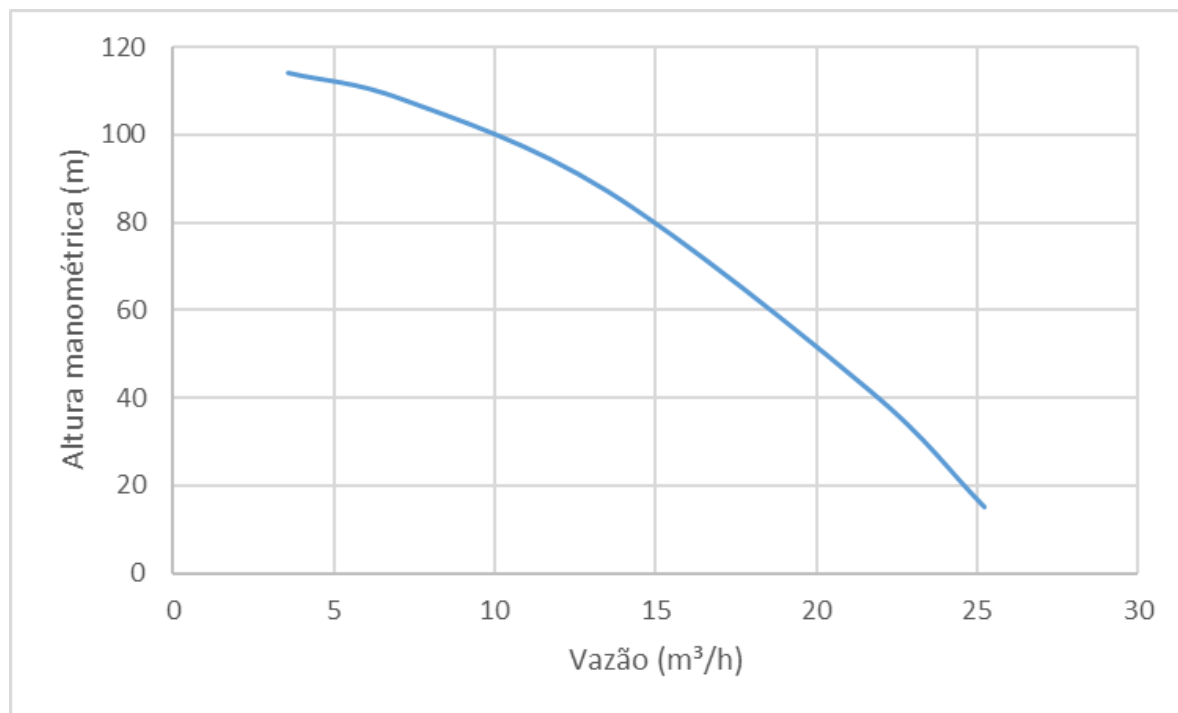


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Devido à escala do desenho, os trechos da bomba e da chegada ao reservatório de jusante foram ampliados. O sistema hidráulico da Adutora de Aurora/CE é formado por 4 bombas (nós 12, 13, 14 e 15) com suas respectivas válvulas de retenção (nós 17, 18, 19 e 20). Além disso, há um trecho de 2,0 metros antes da chegada ao reservatório de jusante (entre os nós 22 e 7).

A curva característica da bomba utilizada na simulação da Adutora de Aurora/CE está na Figura 50 e Tabela 13.

Figura 50 – Curva característica da bomba da Adutora de Aurora/CE



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 13 – Curva característica da bomba da Adutora de Aurora/CE

Vazão (m³/h)	Altura manométrica (m)
3,60	113,938
7,20	107,752
13,50	87,003
21,60	41,768
25,20	14,926

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.6.3. Adutora de Alcântara/MA

A terceira adutora simulada neste trabalho é aquela instalada ficticiamente na cidade de Alcântara/MA, composta principalmente de PVC DEFOFO (pressão máxima admissível de 100 mca), exceto 18,00 m, que são constituídos de Ferro Fundido Flangeado PN 10 (pressão máxima admissível de 200 mca), correspondentes ao trecho de montante do

conjunto motobomba, que apresenta DN de 100 mm. Os demais trechos da adutora são compostos por DN 150 mm.

A adutora apresenta como dados de entrada as informações contidas na Tabela 14, que foram adotados na simulação do UFC 7.

Tabela 14 – Dados de entrada da Adutora de Alcântara/MA

Dados de entrada	
Número de bombas em paralelo	02
Comprimento total (m)	676,04
Vazão inicial (m ³ /s)	0,01177
Nº de horas de funcionamento da bomba (h)	16
Desnível geométrico (m)	19,28
Rugosidade das tubulações (mm)	0,06
Rotação do rotor (rpm)	1.750,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Na Tabela 15, estão as informações acerca das tubulações que compõem a Adutora de Alcântara/MA e na Tabela 16, os dados utilizados para a simulação no UFC 7, inclusive as discretizações espacial e temporal adotadas para atender ao critério de estabilidade de Courant.

Tabela 15 – Dados acerca das tubulações da Adutora de Alcântara/MA

Dados das tubulações		
Parâmetro	FOFO PN 10	PVC DEFOFO
Diâmetro interno (mm)	100	150
Espessura (mm)	6,00	6,80
Módulo de Elasticidade (GPa)	172,00	3,00
Coefficiente de Poisson	0,28	0,38
Celeridade estimada (m/s)	1.325,98	361,74

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 16 – Dados da simulação da Adutora de Alcântara/MA

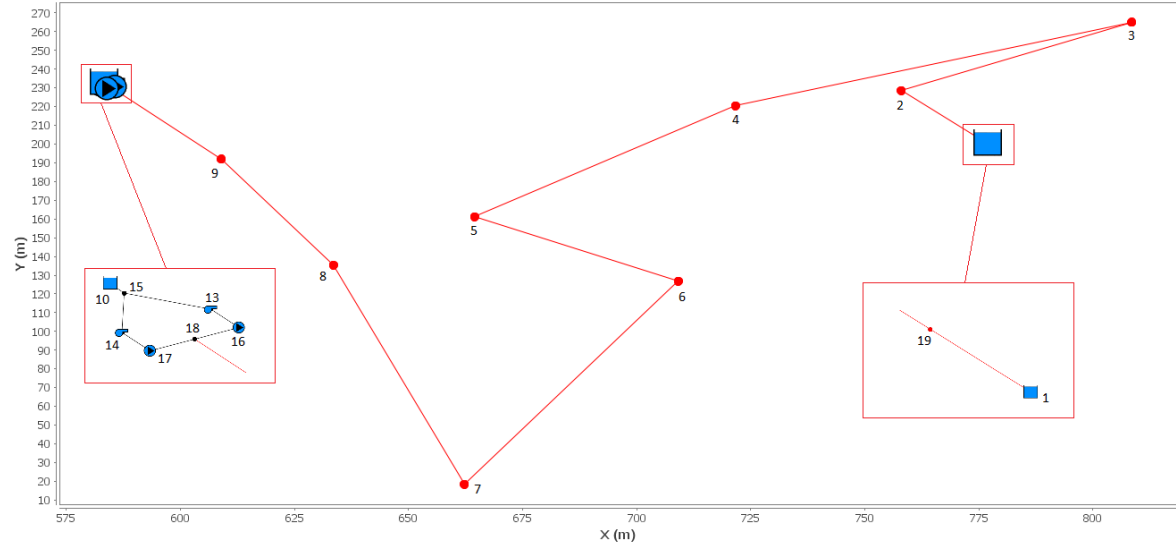
Dados da simulação	
Duração da simulação (s)	60,00
Número de divisões do menor trecho	2
Densidade do fluido (kg/m ³)	997,00
Módulo de elasticidade volumétrica do fluido (Pa)	2,19 x 10 ⁹
Viscosidade cinemática (m ² /s)	0,896 x 10 ⁻⁶
Porcentagem inicial de ar (%)	1,00 x 10 ⁻⁴

Passo de tempo computacional (s)	0,00075
Discretização espacial (m)	0,50

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

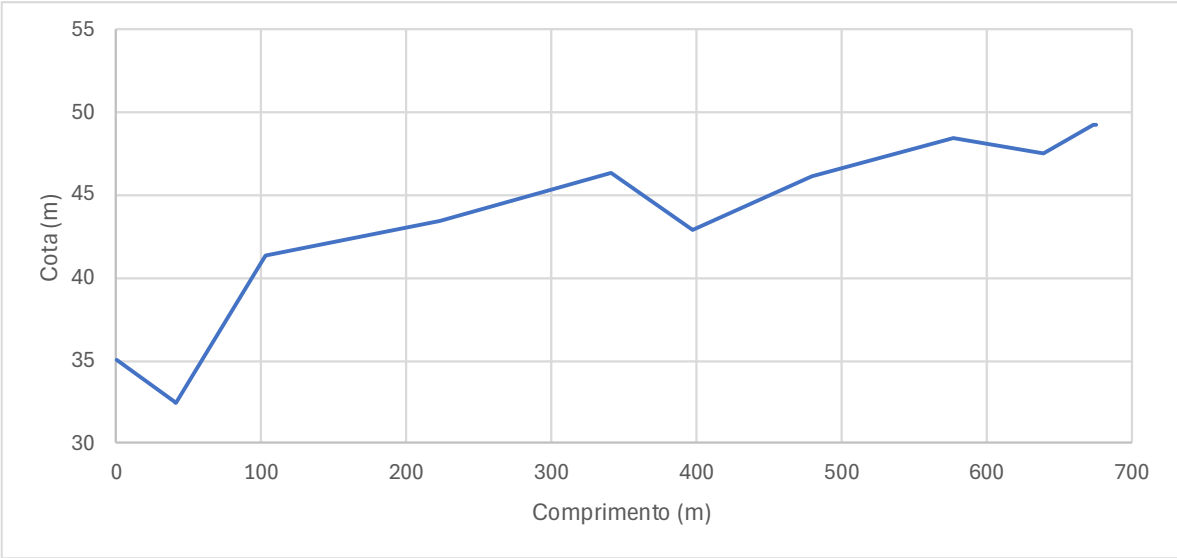
Em planta baixa no UFC 7, a adutora está representada na Figura 51, e em perfil, na Figura 52.

Figura 51 – Planta baixa da Adutora de Alcântara/MA no UFC 7



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 52 – Perfil da Adutora de Alcântara/MA

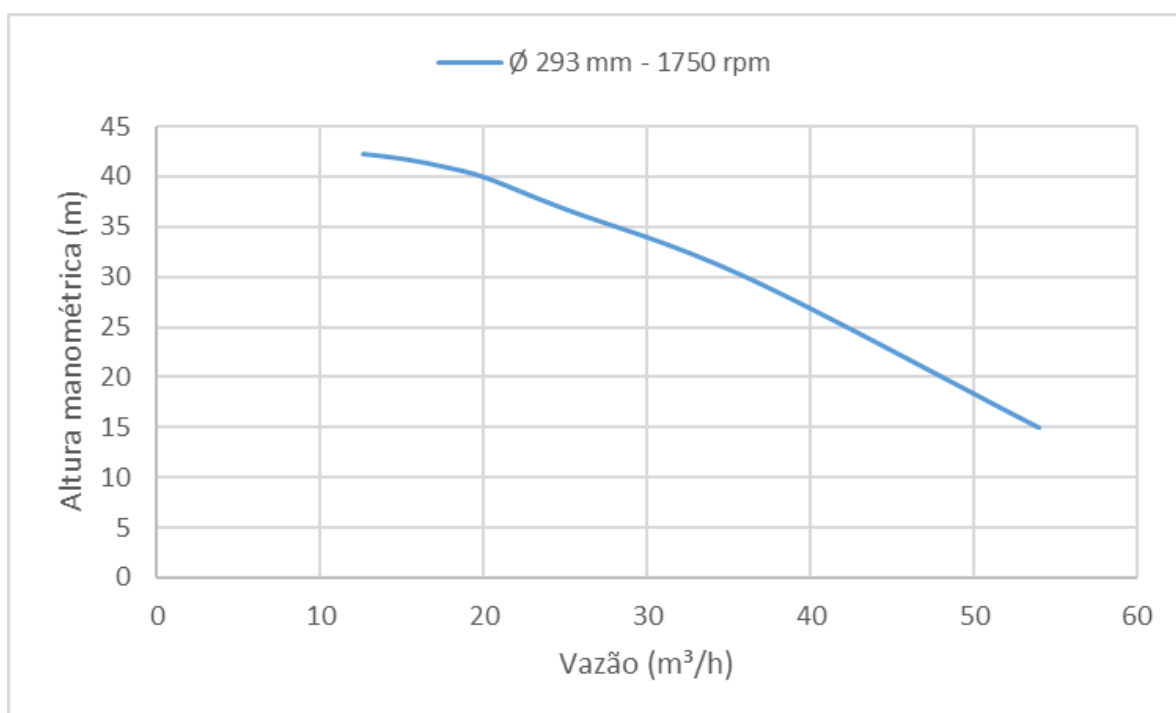


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para melhorar a visualização da adutora, os trechos da bomba e da chegada ao reservatório de jusante foram ampliados. Nessa adutora, o sistema elevatório é formado por 2 bombas (nós 13 e 14) com suas respectivas válvulas de retenção (nós 16 e 17). Além disso, há um trecho de 2,0 metros antes da chegada ao reservatório de jusante (entre os nós 19 e 1).

A curva característica da bomba adotada na simulação da Adutora de Alcântara/MA está na Figura 53 e Tabela 17.

Figura 53 – Curva característica da bomba KSB 40-315



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 17 – Curva característica da bomba KSB 40-315

Vazão (m³/h)	Altura manométrica (m)
12,60	42,20
15,12	41,70
17,64	40,90
20,16	39,80
24,84	36,80
36,00	30,00
54,00	15,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.6.4. Adutora de Acaraú/CE

A Adutora fictícia da cidade de Acaraú/CE foi selecionada para demonstrar o efeito do TAEB em comparação com a Ventosa. Ela é composta em sua totalidade por PVC DEFOFO (pressão máxima admissível de 100 mca) e apresenta os dados de entrada exibidos na Tabela 18.

Tabela 18 – Dados de entrada da Adutora de Acaraú/CE

Dados de entrada	
Número de bombas em paralelo	05
Comprimento total (m)	539,54
Vazão inicial (m ³ /s)	0,22773
Nº de horas de funcionamento da bomba (h)	16
Desnível geométrico (m)	1,00
Rugosidade das tubulações (mm)	0,06
Rotação do rotor (rpm)	1.750,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Acerca de suas tubulações, foram adotadas as informações contidas na Tabela 19, enquanto que a simulação do UFC 7 utilizou os dados da Tabela 20, que também apresenta os dados de discretização espacial e temporal adotados no modelo.

Tabela 19 – Dados acerca das tubulações da Adutora de Acaraú/CE

Dados das tubulações		
Parâmetro	PVC DEFOFO	PVC DEFOFO
Diâmetro interno (mm)	300	250
Espessura (mm)	13,10	11,00
Módulo de Elasticidade (GPa)	3,00	3,00
Coefficiente de Poisson	0,38	0,38
Celeridade estimada (m/s)	362,50	362,36

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 20 – Dados da simulação da Adutora de Acaraú/CE

Dados da simulação	
Duração da simulação (s)	60,00
Número de divisões do menor trecho	2
Densidade do fluido (kg/m ³)	997,00
Módulo de elasticidade volumétrica do fluido (Pa)	2,19 x 10 ⁹

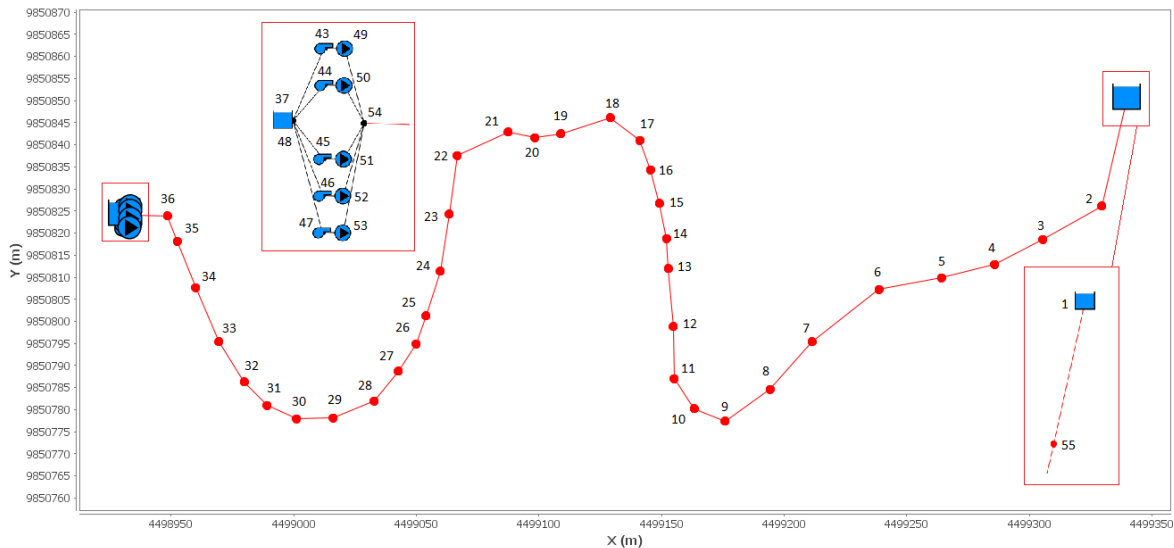
Viscosidade cinemática (m ² /s)	0,896 x 10 ⁻⁶
Porcentagem inicial de ar (%)	1,00 x 10 ⁻⁴
Passo de tempo computacional (s)	0,00130
Discretização espacial (m)	0,50

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A adutora apresenta 15,00 m de extensão com diâmetro de 250 mm e 524,54 m de extensão com diâmetro de 300 mm.

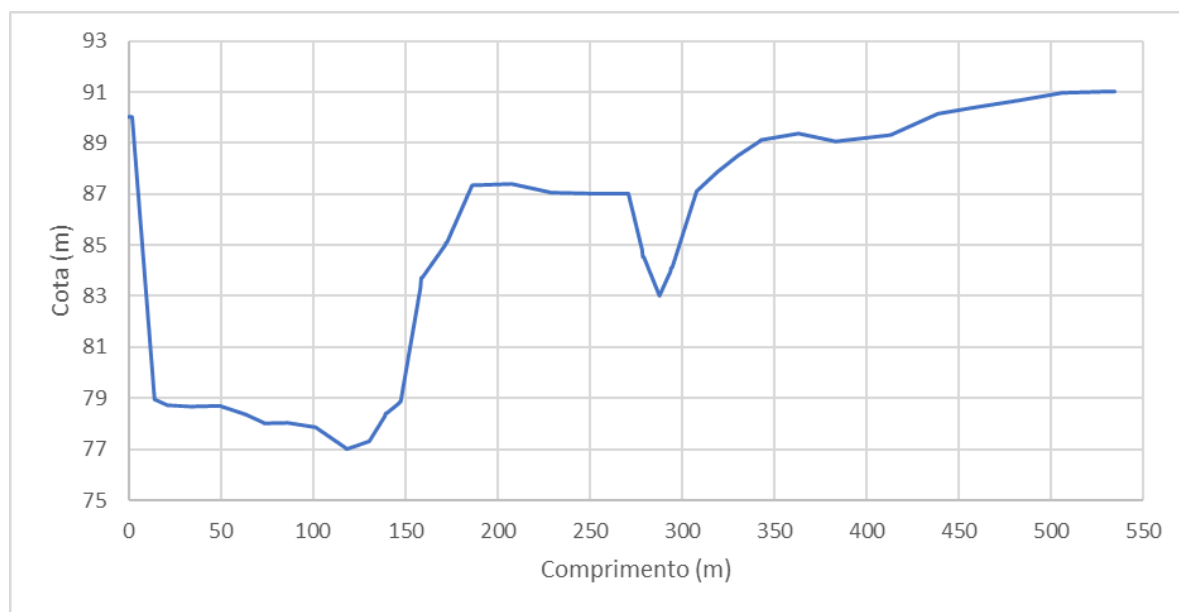
Em planta baixa no UFC 7, a adutora tem a configuração exibida na Figura 54, e em perfil, na Figura 55.

Figura 54 – Planta baixa da Adutora de Acaraú/CE no UFC 7



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 55 – Perfil da Adutora de Acaraú/CE

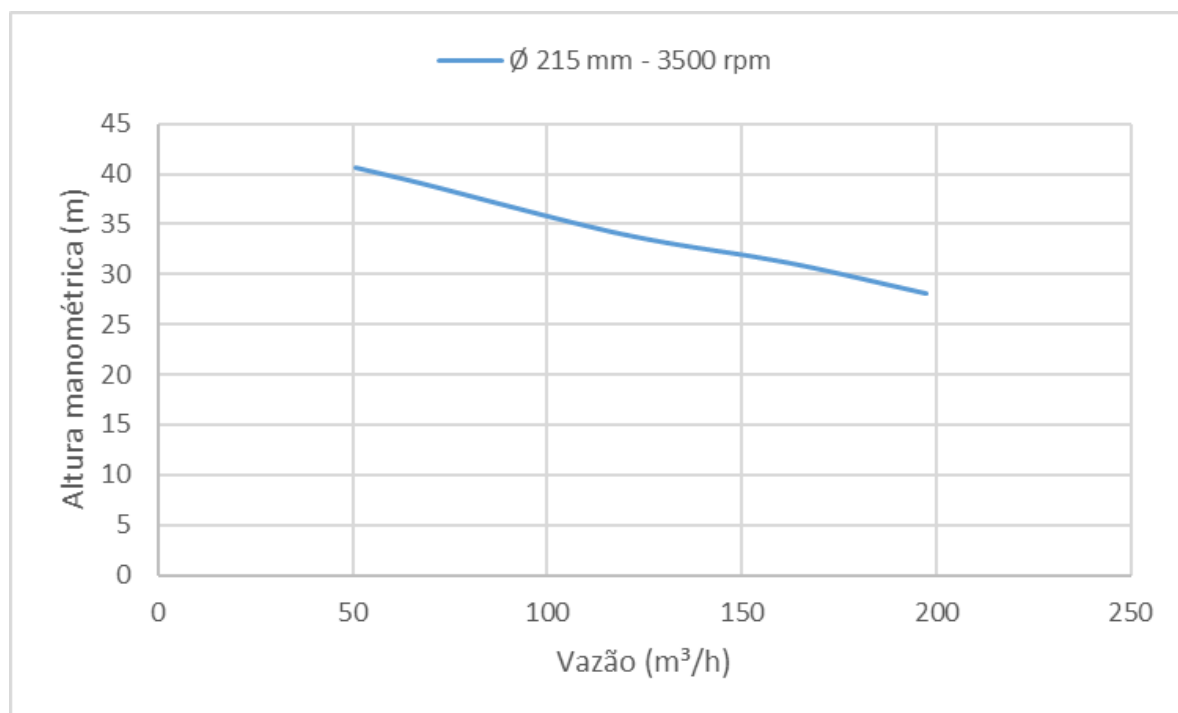


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os trechos da bomba e da chegada ao reservatório de jusante foram ampliados de forma a melhorar a visualização. Nessa adutora, o sistema elevatório é formado por 5 bombas (nós 43, 44, 45, 46 e 47) com suas respectivas válvulas de retenção (nós 49, 50, 51, 52 e 53). Além disso, há um trecho de 2,0 metros antes da chegada ao reservatório de jusante (entre os nós 55 e 1).

A curva característica adotada na simulação está apresentada na Figura 56 e Tabela 21.

Figura 56 – Curva característica da bomba Flygt MT



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 21 – Curva característica da bomba Flygt MT

Vazão (m³/h)	Altura manométrica (m)
50,76	40,60
68,04	39,00
119,16	34,00
161,28	31,20
197,28	28,10

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.6.5. Adutora do Loteamento Araripina/PE

A Adutora fictícia do Loteamento Araripina/PE também foi selecionada para ilustrar os resultados comparando a atuação separadamente do TAEB e da Ventosa. Essa adutora é composta praticamente em sua totalidade por PEAD-80 PN8 (pressão máxima admissível de 80 mca), sendo apenas 2,00 m composta por PVC DEFOFO (pressão máxima admissível de 100 mca), referente ao trecho de chegada ao reservatório de jusante. A adutora apresenta os dados de entrada apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 – Dados de entrada da Adutora do Loteamento Araripina/PE

Dados de entrada	
Número de bombas em paralelo	01
Comprimento total (m)	649,96
Vazão inicial (m ³ /s)	0,00451
Nº de horas de funcionamento da bomba (h)	16
Desnível geométrico (m)	7,97
Rugosidade das tubulações (mm)	0,025
Rotação do rotor (rpm)	1.720,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

As informações sobre as tubulações da adutora estão na Tabela 23 e os dados adotados na simulação do UFC 7, na Tabela 24.

Tabela 23 – Dados acerca das tubulações da Adutora do Loteamento Araripina/PE

Dados das tubulações		
Parâmetro	PEAD PN 8	PVC DEFOFO
Diâmetro interno (mm)	90	100
Espessura (mm)	5,40	4,80
Módulo de Elasticidade (GPa)	0,85	3,00
Coefficiente de Poisson	0,45	0,38
Celeridade estimada (m/s)	244,67	415,26

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 24 – Dados da simulação da Adutora do Loteamento Araripina/PE

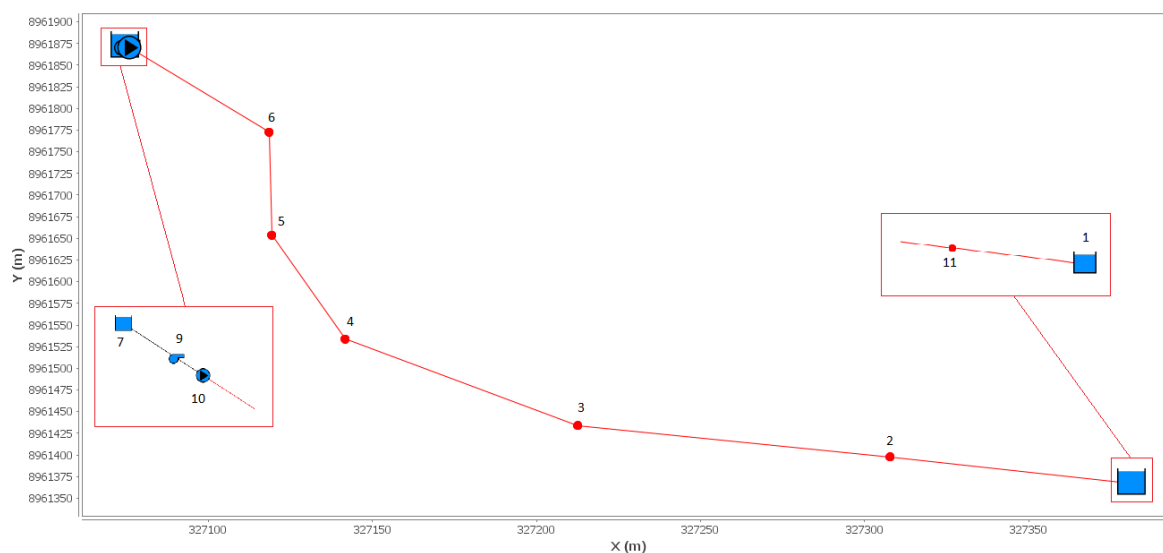
Dados da simulação	
Duração da simulação (s)	60,00
Número de divisões do menor trecho	2
Densidade do fluido (kg/m ³)	997,00
Módulo de elasticidade volumétrica do fluido (Pa)	$2,19 \times 10^9$
Viscosidade cinemática (m ² /s)	$0,896 \times 10^{-6}$
Porcentagem inicial de ar (%)	$1,00 \times 10^{-4}$
Passo de tempo computacional (s)	0,00161
Discretização espacial (m)	1,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Em termos de diâmetros, essa adutora apresenta 2,00 m de extensão com 100 mm entre os nós 11 e 1 e o restante é composto por diâmetro de 90 mm.

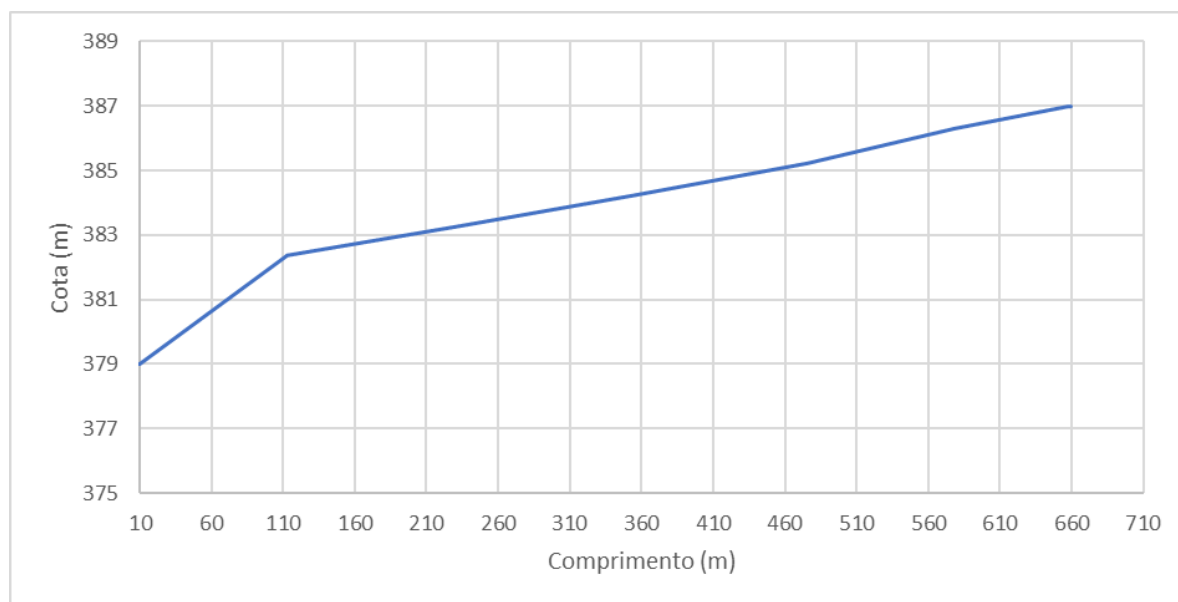
Em planta baixa, a adutora está representada no UFC 7 conforme a Figura 57, e em perfil, conforme a Figura 58.

Figura 57 – Planta baixa da Adutora do Loteamento Araripina/PE no UFC 7



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 58 – Perfil da Adutora do Loteamento Araripina/PE



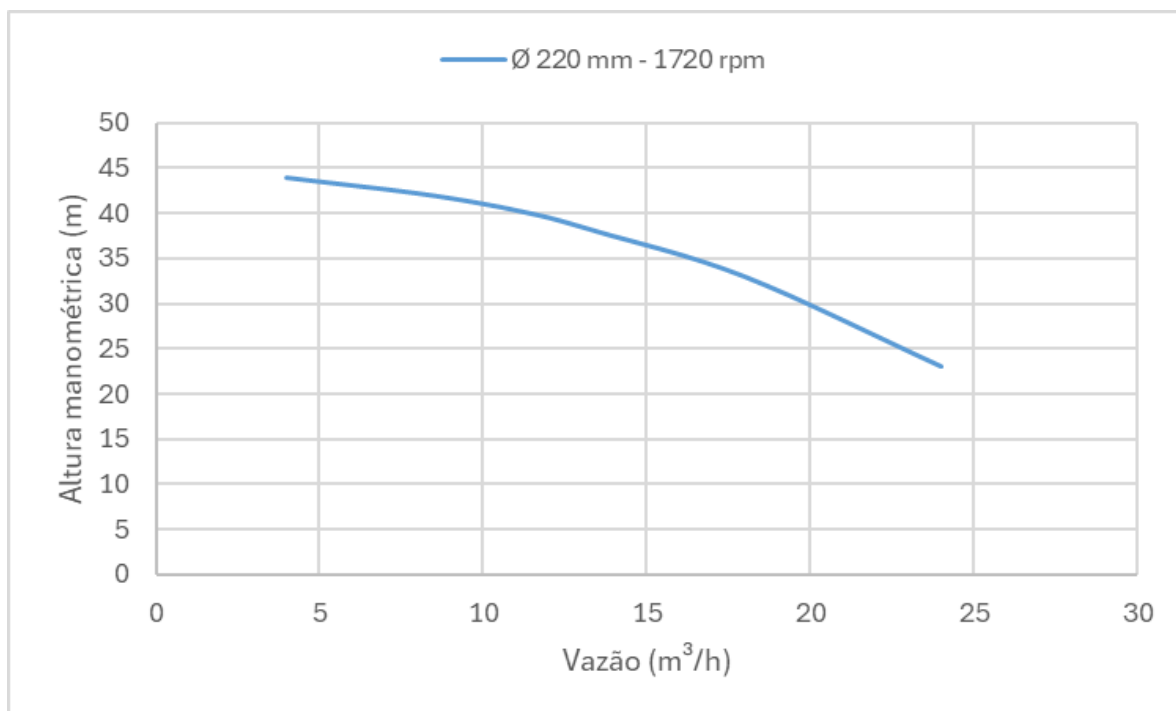
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os trechos da bomba e da chegada ao reservatório de jusante foram ampliados de tal forma a favorecer a visualização. O sistema elevatório é formado por 1 bomba (nó 9) com

uma válvula de retenção (nó 10) e o reservatório de jusante apresenta um trecho de 2,0 metros antes da sua entrada (entre os nós 11 e 1).

Essa adutora foi simulada considerando os dados da curva característica presentes na Figura 59 e Tabela 25.

Figura 59 – Curva característica da bomba IMBIL ITAP



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 25 – Curva característica da bomba IMBIL ITAP

Vazão (m³/h)	Altura manométrica (m)
4,00	44,00
8,50	42,00
11,48	40,00
13,50	38,00
18,00	33,00
24,01	23,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.6.6. Diretrizes para as Simulações do UFC 7 e Critérios de Avaliação de Desempenho do TAEB

No Capítulo 4, estão demonstrados os resultados obtidos para as cinco simulações realizadas, inclusive com a comparação de envoltórias e variação de pressão na válvula de retenção e no ponto onde o TAEB foi instalado, nas duas situações: simulação sem e com TAEB. O intuito foi avaliar a influência do TAEB no alívio do transiente, assim como verificar quais as situações em que ele é mais indicado e também propor as melhores combinações das variáveis altura e diâmetro do TAEB e diâmetro da Ventosa em função dos resultados obtidos, de modo a orientar a melhor decisão em termos de projetos de adutoras com dispositivos de alívio.

Nos casos simulados, o diâmetro do TAEB foi considerado maior ou igual ao diâmetro da adutora, enquanto que o diâmetro da Ventosa instalada foi obtido conforme várias simulações realizadas. O diâmetro ideal de Ventosa para cada adutora foi aquele em que, a partir do qual, ao aumentar o valor de diâmetro, não há mudanças na variação do nível de água em relação ao valor anterior.

Ademais, a escolha do local onde o TAEB foi posicionado dependeu do resultado da simulação sem nenhum dispositivo de alívio, de tal forma que o TAEB foi simulado no local com a menor subpressão apresentada, com o intuito de avaliar a sua função de alívio de pressões negativas. De forma a obter o ponto de menor subpressão da adutora, foi realizada a simulação com o MOC, uma vez que ele não limita a subpressão ao valor da pressão de vapor da água. As envoltórias de pressões exibidas nos casos estudados foram obtidas a partir do modelo de cavitação presente no UFC 7.

Por fim, também foram realizadas comparações entre os resultados obtidos com TAEB e com Ventosa no mesmo nó, considerando a mesma Ventosa que foi utilizada no TAEB na primeira simulação. O objetivo foi avaliar as vantagens da inclusão do tubo prolongado junto à Ventosa no que diz respeito à atenuação de pressões nos sistemas. Após as simulações com a Ventosa, foram testadas Chaminés de Equilíbrio no mesmo nó onde foram testados os outros dispositivos, também com o objetivo de verificar o desempenho do TAEB frente à Chaminé. Destaca-se que, para o cálculo do transiente adotando-se a Chaminé de Equilíbrio, os dados de entrada foram obtidos pelo próprio UFC 7, que apresenta uma rotina de pré-dimensionamento que considera os dados da simulação do transiente sem nenhum dispositivo de tal forma a determinar os parâmetros que a Chaminé necessita para o cálculo do seu modelo numérico.

Ao final das simulações, foram criadas tabelas de resumo das pressões máximas e mínimas obtidas em todos os nós simulados. Para avaliar se o TAEB foi efetivo no combate ao transiente em relação à simulação sem dispositivos, as pressões foram comparadas subtraindo-se a pressão da simulação sem dispositivos pela pressão da simulação com o TAEB e foram criados os seguintes critérios de avaliação:

Para Pressões Máximas, foram avaliados os critérios dados pelas Equações (139), (140) e (141):

$$P_{sem} - P_{com} > 0 \rightarrow \text{TAEB melhorou o resultado} \quad (139)$$

$$P_{sem} - P_{com} < 0 \rightarrow \text{TAEB piorou o resultado} \quad (140)$$

$$P_{sem} - P_{com} = 0 \rightarrow \text{TAEB foi indiferente no resultado} \quad (141)$$

Para Pressões Mínimas, foram avaliados os critérios dados pelas Equações (142), (143) e (144):

$$P_{sem} - P_{com} > 0 \rightarrow \text{TAEB piorou o resultado} \quad (142)$$

$$P_{sem} - P_{com} < 0 \rightarrow \text{TAEB melhorou o resultado} \quad (143)$$

$$P_{sem} - P_{com} = 0 \rightarrow \text{TAEB foi indiferente no resultado} \quad (144)$$

Da mesma forma, foi realizada a comparação entre o TAEB e a Ventosa, considerando-se a subtração entre as pressões obtidas na simulação com o TAEB pelas pressões obtidas na simulação com a Ventosa, estabelecendo-se os seguintes critérios de avaliação:

Para Pressões Máximas, foram criados os critérios dados pelas Equações (145), (146) e (147):

$$P_{TAEB} - P_{Ventosa} > 0 \rightarrow \text{TAEB foi pior do que a Ventosa} \quad (145)$$

$$P_{TAEB} - P_{Ventosa} < 0 \rightarrow \text{TAEB foi melhor do que a Ventosa} \quad (146)$$

$$P_{TAEB} - P_{Ventosa} = 0 \rightarrow \text{Sem diferenças na atuação} \quad (147)$$

Para Pressões Mínimas, foram criados os critérios dados pelas Equações (148), (149) e (150):

$$P_{TAEB} - P_{Ventosa} > 0 \rightarrow \text{TAEB foi melhor do que a Ventosa} \quad (148)$$

$$P_{TAEB} - P_{Ventosa} < 0 \rightarrow \text{TAEB foi pior do que a Ventosa} \quad (149)$$

$$P_{TAEB} - P_{Ventosa} = 0 \rightarrow \text{Sem diferenças na atuação} \quad (150)$$

De forma análoga, foi realizada a comparação entre o TAEB e a Chaminé de Equilíbrio, considerando-se a subtração entre as pressões obtidas na simulação com o TAEB pelas pressões obtidas na simulação com a Chaminé de Equilíbrio, estabelecendo-se os seguintes critérios de avaliação:

Para Pressões Máximas, foram criados os critérios dados pelas Equações (151), (152) e (153):

$$P_{TAEB} - P_{Chaminé} > 0 \rightarrow \text{TAEB foi pior do que a Chaminé} \quad (151)$$

$$P_{TAEB} - P_{Chaminé} < 0 \rightarrow \text{TAEB foi melhor do que a Chaminé} \quad (152)$$

$$P_{TAEB} - P_{Chaminé} = 0 \rightarrow \text{Sem diferenças na atuação} \quad (153)$$

Para Pressões Mínimas, foram criados os critérios dados pelas Equações (154), (155) e (156):

$$P_{TAEB} - P_{Chaminé} > 0 \rightarrow \text{TAEB foi melhor do que a Chaminé} \quad (154)$$

$$P_{TAEB} - P_{Chaminé} < 0 \rightarrow \text{TAEB foi pior do que a Chaminé} \quad (155)$$

$$P_{TAEB} - P_{Chaminé} = 0 \rightarrow \text{Sem diferenças na atuação} \quad (156)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Adutora da Fazenda Santa Maria

A simulação da adutora com o TAEB foi realizada, inicialmente, com a operação normal da adutora. Em seguida, a bomba foi desligada de forma a provocar a ação do TAEB para aliviar o transitório hidráulico. No momento da atuação do TAEB, foi medido o rebaixamento do nível de água com trena de fita, cuja precisão de medição é da ordem de 0,5 a 1,0 mm.

O rebaixamento máximo atingido no TAEB durante a simulação foi registrado e está na Figura 60.

Figura 60 – Rebaixamento máximo do nível de água durante a simulação da Adutora da Fazenda Santa Maria



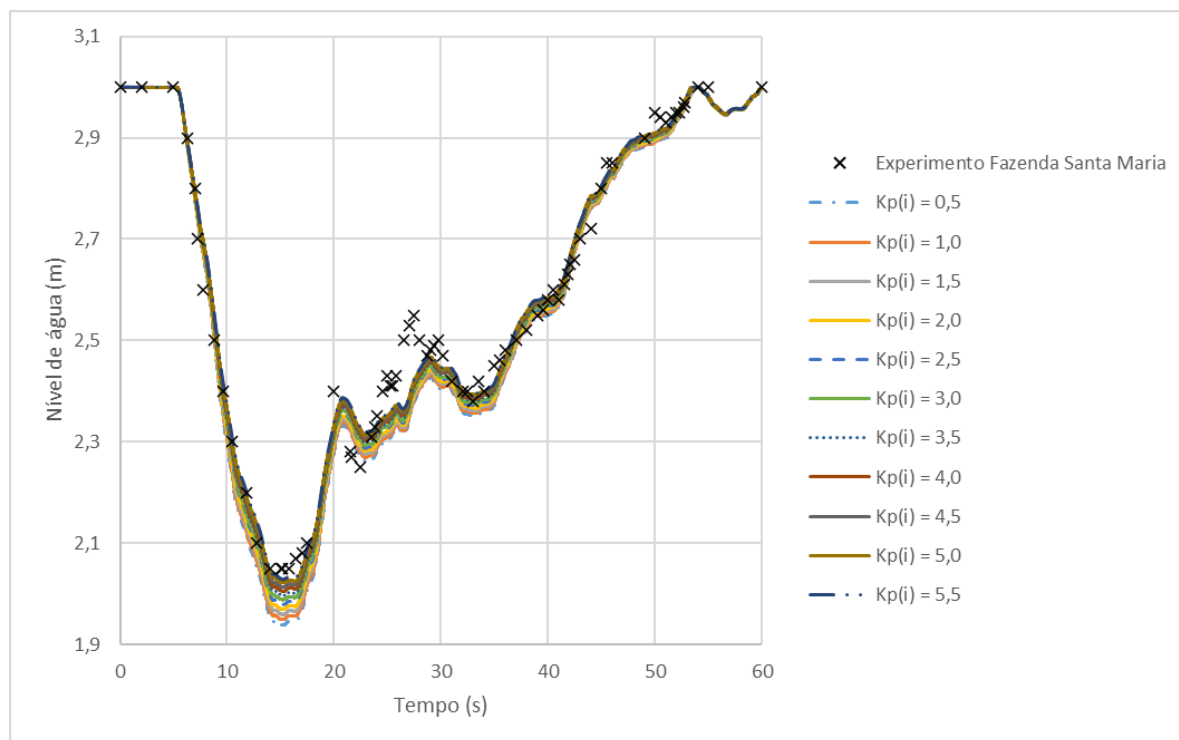
Fonte: Márcio Luiz de Carvalho (2023).

Dessa forma, houve um processo de validação do modelo no UFC 7 por meio da variação de alguns dados de entrada até atingir o rebaixamento do nível de água o mais próximo possível daquele coletado durante o experimento realizado na Adutora da Fazenda Santa Maria. O modelo demonstrado na metodologia, resumido no fluxograma da Figura 44, foi aquele que mais se aproximou do dado obtido em campo.

4.1.1. Validação do Modelo

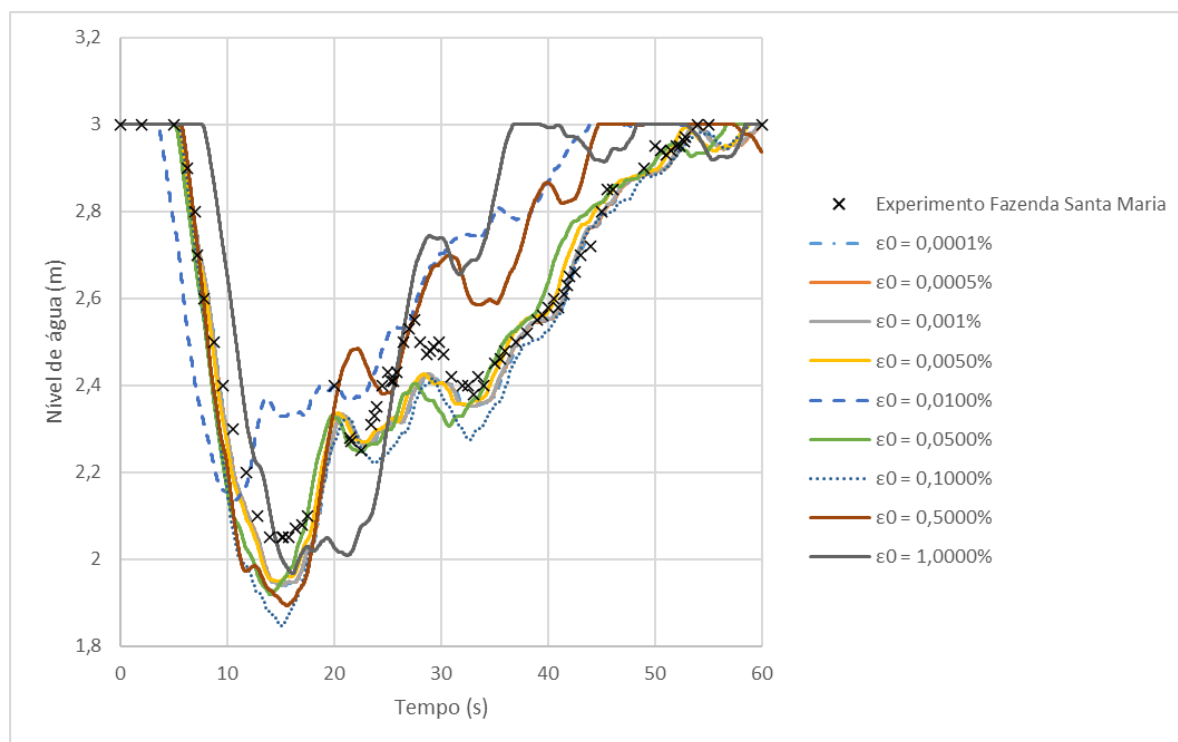
Durante a validação, observou-se não haver influência no resultado de rebaixamento de nível de água com a variação dos coeficientes de descarga da Ventosa para entrada e saída de ar (C_{adm} e C_{exp}), que correspondem a coeficientes que relacionam a vazão mássica de ar que entra e sai da Ventosa com a área de admissão e expulsão de ar, respectivamente. No entanto, a variação do coeficiente de perda localizada no orifício do TAEB ($K_p(i)$) e da porcentagem inicial de ar (ε_0), que corresponde ao valor inicial de ar utilizado no modelo de cavitação, provocou mudanças no resultado. O processo de validação do modelo trouxe como gráficos os observados na Figura 61 e na Figura 62. A variação do $K_p(i)$ foi realizada mantendo-se ε_0 constante e igual a 0,0001%, enquanto que na simulação da variação de ε_0 , manteve-se $K_p(i)$ constante e igual a 0,50.

Figura 61 – Análise de sensibilidade do parâmetro $K_p(i)$ para o experimento da Fazenda Santa Maria



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 62 – Análise de sensibilidade do parâmetro ε_0 para o experimento da Fazenda Santa Maria



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Visualmente, nota-se que a variação do coeficiente de perda na entrada do TAEB alterou o resultado de forma menos sensível, enquanto que a porcentagem inicial de ar foi o parâmetro que mais teve influência sobre o resultado.

A análise estatística dos dois parâmetros está resumida na Tabela 26 e na Tabela 27.

Tabela 26 – Análise estatística do parâmetro $K_p(i)$ para o experimento da Fazenda Santa Maria

Coeficiente de perda na entrada do TAEB	EQM	NSE
$K_p(i) = 0,50$	0,069	0,939
$K_p(i) = 1,00$	0,064	0,946
$K_p(i) = 1,50$	0,060	0,952
$K_p(i) = 2,00$	0,057	0,958
$K_p(i) = 2,50$	0,054	0,962
$K_p(i) = 3,00$	0,051	0,966
$K_p(i) = 3,50$	0,049	0,969
$K_p(i) = 4,00$	0,047	0,971

$K_p(i) = 4,50$	0,045	0,973
$K_p(i) = 5,00$	0,044	0,974
$K_p(i) = 5,50$	0,044	0,975

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 27 – Análise estatística do parâmetro ε_0 para o experimento da Fazenda Santa Maria

Porcentagem inicial de ar	EQM	NSE
$\varepsilon_0 = 0,0001\%$	0,069	0,938
$\varepsilon_0 = 0,0005\%$	0,066	0,943
$\varepsilon_0 = 0,0010\%$	0,066	0,943
$\varepsilon_0 = 0,0050\%$	0,063	0,948
$\varepsilon_0 = 0,0100\%$	0,224	0,346
$\varepsilon_0 = 0,0500\%$	0,087	0,900
$\varepsilon_0 = 0,1000\%$	0,107	0,851
$\varepsilon_0 = 0,5000\%$	0,152	0,698
$\varepsilon_0 = 1,0000\%$	0,244	0,222

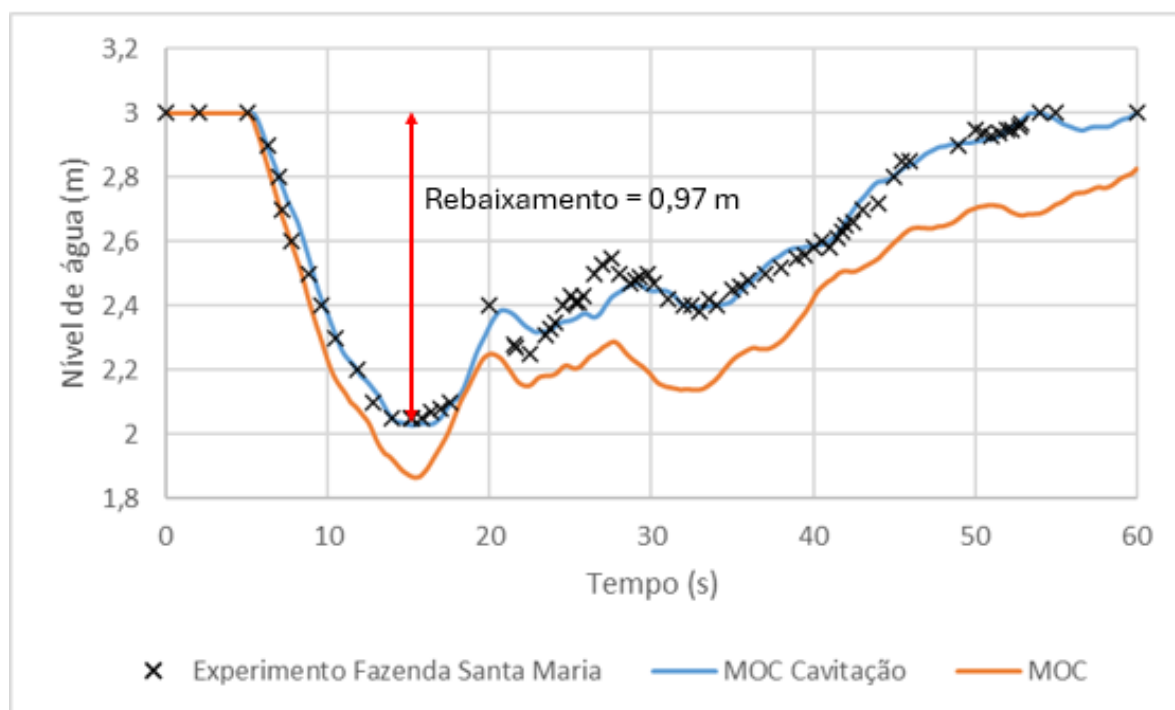
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Portanto, observa-se que o melhor resultado para $K_p(i)$ foi quando ele foi simulado com o valor de 5,50, enquanto que para ε_0 , quando ele foi simulado com o valor de 0,0050%. Assim, foi realizada uma nova simulação considerando $K_p(i) = 5,50$ e $\varepsilon_0 = 0,0050\%$. Entretanto, essa simulação trouxe um erro quadrático médio de 0,047 e um coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0,971, ou seja, a simulação foi levemente menos próxima do resultado de campo do que aquela simulada com $K_p(i) = 5,50$ e $\varepsilon_0 = 0,0001\%$, que obteve como parâmetros estatísticos 0,044 e 0,975, respectivamente.

Assim, conclui-se, por essa análise estatística, que o melhor ajuste dos dados simulados aos dados medidos no experimento da Fazenda Santa Maria foi obtido para $K_p(i) = 5,50$ e $\varepsilon_0 = 0,0001\%$.

Na Figura 63, é possível visualizar o resultado do nível da água que possibilita a validação do modelo. Também está ilustrada no gráfico a simulação com o MOC, o que demonstra que, para os mesmos valores de $K_p(i)$ e ε_0 , a utilização do modelo de transientes sem cavitação traz resultados mais distantes daquele obtido em campo. Por padrão, o coeficiente de perda na entrada do TAEB foi configurado para 5,50 e a porcentagem inicial de ar para 0,0001% para as demais simulações com o dispositivo.

Figura 63 – Nível de água no TAEB ao longo do tempo de simulação no UFC 7 na Adutora da Fazenda Santa Maria



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

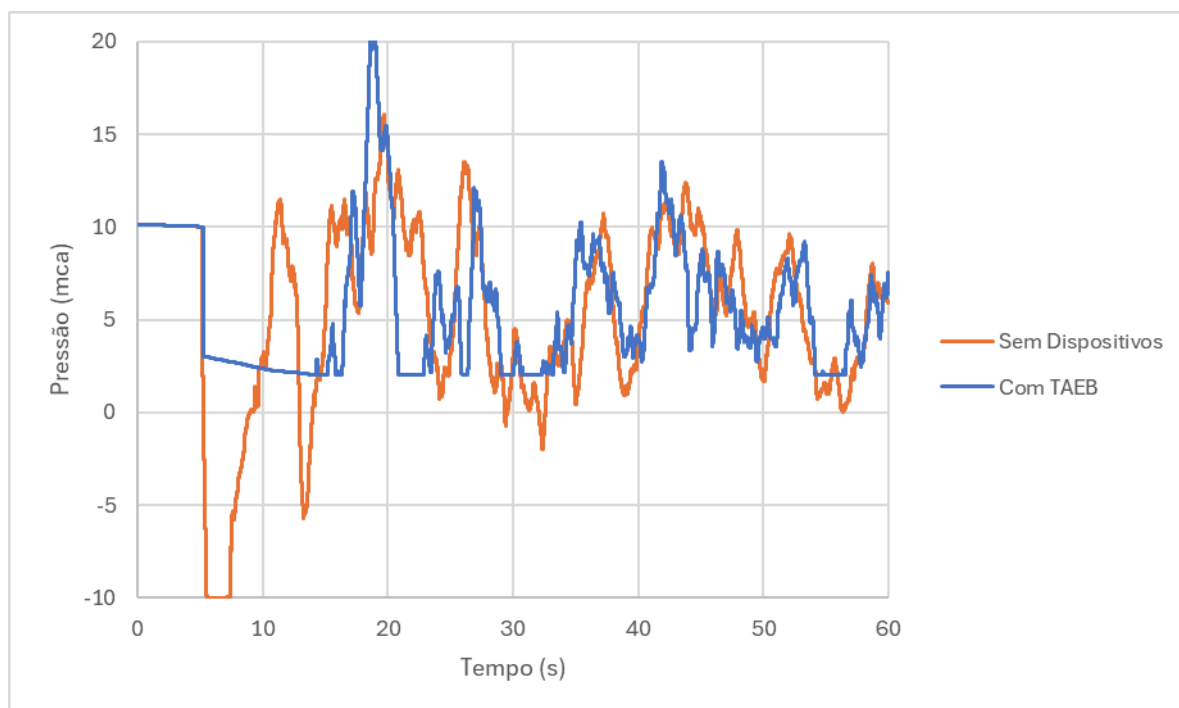
É possível observar que, após o desligamento da bomba, o nível de água no TAEB se mantém no nível inicial de 3,00 m até aproximadamente 5 segundos de simulação, o que corresponde ao tempo que a onda de subpressão leva para atingir o dispositivo e para que ele comece a atuar. A partir desse momento, ocorre a redução do nível de água para combater a subpressão no ponto onde o TAEB está instalado, atingindo uma altura de aproximadamente 2,03 m, o que corresponde a um rebaixamento estimado em 0,97 m. O nível mais baixo de água é mantido por aproximadamente 2 segundos.

A partir desse momento, começa a atuação da Ventosa instalada no TAEB, pois o nível de água começa a se elevar e oscilar, de acordo com a admissão e/ou expulsão de ar promovidas pela Ventosa. Essa oscilação se mantém por aproximadamente 35 segundos, quando o nível se estabiliza novamente em 3,00 m.

4.1.2. Comparação com Situação sem Dispositivos de Proteção

A parada do conjunto motobomba da Adutora da Fazenda Santa Maria no UFC 7 produziu o resultado de pressão presente na Figura 64, referente à seção onde foi instalado o TAEB, comparando as simulações sem Dispositivos e com TAEB.

Figura 64 – Comparação da pressão na seção do TAEB nas situações sem Dispositivos e com TAEB na Adutora da Fazenda Santa Maria



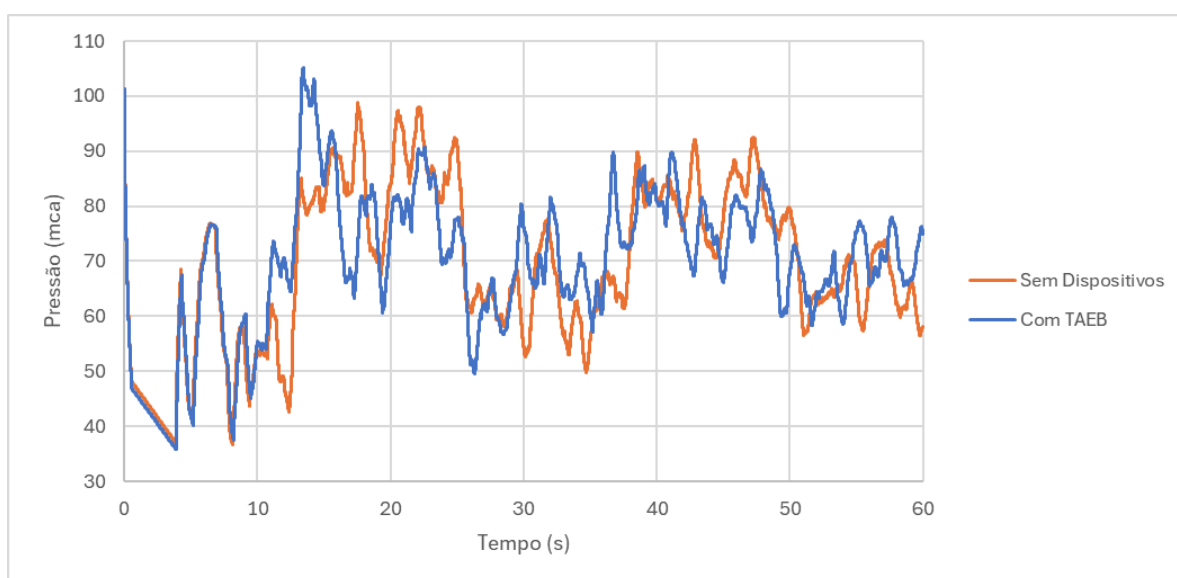
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Conforme já mencionado, os resultados obtidos foram simulados com o modelo de cavitação, o que limita a subpressão no valor aproximado de -10,01 mca, correspondente à pressão de vapor da água ao considerar a pressão barométrica de 10,33 mca. Na situação sem dispositivos de alívio, ocorrem pressões negativas nos intervalos aproximados de 6 a 8 segundos, 12 a 13 segundos, 28 a 29 segundos e 32 a 33 segundos. Ao inserir o TAEB, observa-se que ele cumpre efetivamente a sua função de proteção contra subpressões, pois há limitação de pressão a uma altura que corresponde ao nível mínimo de água que ocorre no dispositivo durante toda a simulação, ou seja, 2,03 mca. O efeito do TAEB começa a ocorrer quando o nível de água começa a se reduzir, ou seja, a partir de aproximadamente 5 segundos de simulação.

Em contrapartida, em alguns momentos da simulação, ocorrem sobrepressões maiores do que aquelas obtidas sem o dispositivo, mas são pressões que estão abaixo da resistência do material, o que não desencadeia maiores problemas quanto à ruptura da adutora na seção onde o TAEB está instalado. Assim, a maior preocupação para esse caso são as pressões negativas, mas elas são combatidas de maneira eficaz pelo TAEB.

Para a seção da válvula de retenção, foi elaborada a Figura 65, que corresponde aos resultados de pressão comparando as simulações sem Dispositivos e com o TAEB.

Figura 65 – Comparação da pressão na seção da válvula de retenção nas situações sem Dispositivos e com TAEB na Adutora da Fazenda Santa Maria



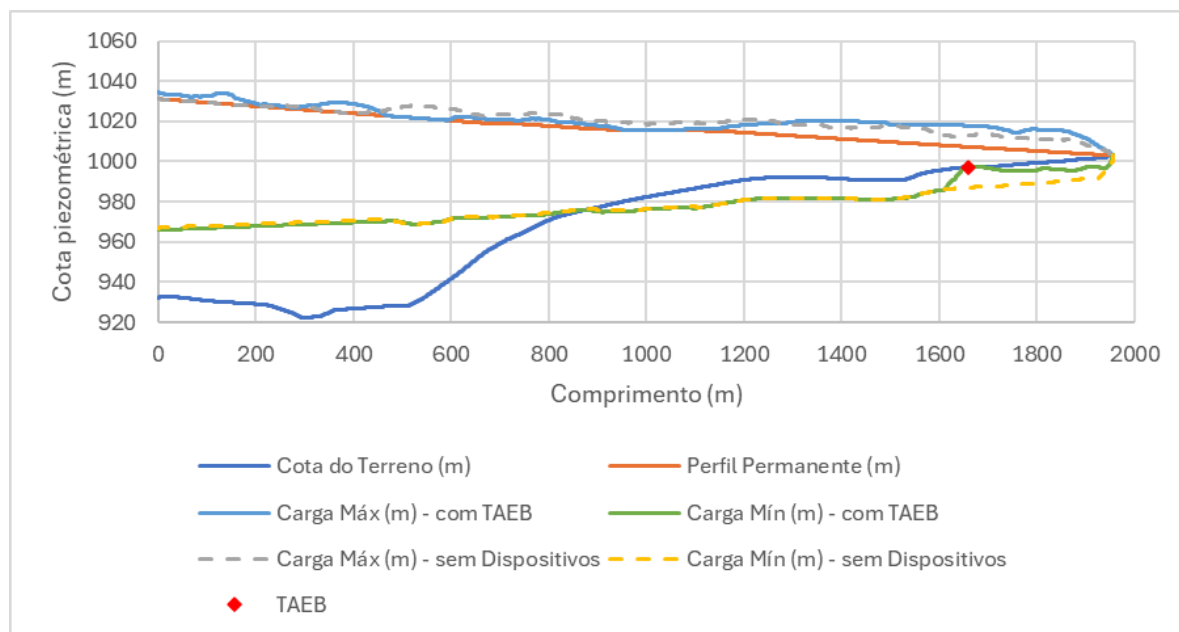
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O efeito do TAEB se propaga até a seção da válvula de retenção a partir de 11 segundos, intervalo que corresponde ao rebaixamento do nível de água observado no TAEB, que ocorre a partir de 5 segundos de simulação, com o tempo de retorno da onda de pressão até a válvula de retenção. A partir de então, observa-se alteração no comportamento oscilatório da pressão em relação à situação sem dispositivos.

Em todo o tempo de simulação, percebe-se que as pressões negativas são combatidas efetivamente pelo TAEB, porém existe a contrapartida da elevação da sobrepressão em comparação com a situação sem o dispositivo. No entanto, nessa seção, só há um momento em que a sobrepressão é maior na situação com o TAEB e o valor é cerca de 6,00 mca acima da maior sobrepressão obtida na situação sem o TAEB, o que não é uma diferença significativa a ponto de impossibilitar a utilização do TAEB para essa adutora.

As envoltórias comparando as duas simulações (sem Dispositivos e com TAEB) estão representadas na Figura 66. Também está apresentado o local onde o TAEB foi instalado.

Figura 66 – Comparação das envoltórias máximas e mínimas nas situações sem Dispositivos e com TAEB na Adutora da Fazenda Santa Maria



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Percebe-se que a envoltória de subpressão não se altera até o momento em que a primeira onda de subpressão atinge o dispositivo. A partir de um ponto nas proximidades do dispositivo e a montante dele, o TAEB eleva as pressões mínimas até uma altura que corresponde ao nível do terreno somado ao rebaixamento máximo atingido no dispositivo. Logo após, a envoltória volta a ser mais baixa, mas sempre com valores acima da situação sem o TAEB, até atingir o reservatório de jusante. As sobrepressões são alteradas após a onda de pressão atingir o reservatório e retornar, gerando a envoltória de máximas pressões apresentadas. O TAEB afeta minimamente essa envoltória, sem comprometer de maneira significativa a resistência do material que compõe a adutora. Nota-se, também, que o TAEB provoca valores maiores de sobrepressões nos pontos a jusante de onde ele está instalado.

Por fim, na Tabela 28 estão as informações de pressões máximas e mínimas de cada nó analisado nesta simulação. Para fins de averiguar a severidade do transiente em termos de pressões mínimas, também estão demonstrados os resultados obtidos com o MOC.

Tabela 28 – Pressões máximas e mínimas da Adutora da Fazenda Santa Maria

Nós	Contorno	Simulação sem Dispositivos – MOC		Simulação sem dispositivos – MOC Cavitação		Simulação com TAEB – MOC Cavitação		Comparação – Sem dispositivos e TAEB	
		Pressão Máx (mca)	Pressão Mín (mca)	Pressão Máx (mca)	Pressão Mín (mca)	Pressão Máx (mca)	Pressão Mín (mca)	$\Delta P_{\min}$ (mca)	$\Delta P_{\max}$ (mca)
12	Reservatório de Nível Fixo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
57	Bomba	118,773	24,902	118,658	36,598	118,601	35,713	0,885	0,057
58	Válvula de Retenção	104,779	25,051	101,210	36,646	105,142	35,728	0,918	-3,932
55	Junção	2,461	-5,749	1,579	-5,445	1,887	-4,932	-0,513	-0,308
10	Junção	1,416	-3,181	0,638	-2,984	0,554	-1,815	-1,169	0,084
54	Junção	4,631	-6,343	3,251	-6,002	3,395	-5,063	-0,939	-0,144
53	Junção	5,448	-7,524	3,833	-7,119	4,261	-4,899	-2,220	-0,428
52	Junção	10,554	-16,498	6,805	-10,007	9,960	-4,117	-5,890	-3,155
51	Junção	12,569	-19,961	8,929	-10,007	11,725	-5,007	-5,000	-2,796
50	Junção	18,044	-22,318	10,627	-10,007	15,241	-4,280	-5,727	-4,614
49	Junção	22,751	-25,827	11,496	-10,007	16,870	-3,819	-6,188	-5,374
48	Junção	23,851	-24,895	14,130	-10,007	16,748	-3,139	-6,868	-2,618
47	Junção	25,246	-23,888	15,965	-10,007	19,530	-1,081	-8,926	-3,565
46	Junção	27,531	-25,484	16,075	-10,007	20,369	-0,042	-9,965	-4,294
45	TAEB	28,422	-25,685	16,112	-10,007	20,611	2,028	-12,035	-4,499
44	Junção	28,388	-25,920	16,123	-10,007	20,870	-0,096	-9,911	-4,747
43	Junção	28,366	-25,582	15,849	-10,007	21,352	-4,462	-5,545	-5,503
42	Junção	29,644	-24,074	19,947	-10,007	23,093	-10,007	0,000	-3,146
41	Junção	31,606	-22,592	22,892	-10,007	24,510	-10,007	0,000	-1,618
40	Junção	34,756	-19,909	26,120	-8,861	27,232	-9,021	0,160	-1,112
39	Junção	34,069	-21,472	26,413	-10,007	28,528	-10,007	0,000	-2,115
38	Junção	35,012	-22,928	25,580	-9,595	28,953	-9,596	0,001	-3,373
37	Junção	34,150	-23,574	26,035	-10,007	28,042	-10,007	0,000	-2,007
36	Junção	34,314	-23,450	26,267	-10,007	27,945	-10,007	0,000	-1,678
35	Junção	35,419	-23,224	28,515	-10,007	27,035	-10,007	0,000	1,480
34	Junção	38,792	-21,618	30,094	-10,007	27,222	-10,007	0,000	2,872
33	Junção	40,008	-19,146	30,597	-10,007	27,693	-10,007	0,000	2,904
32	Junção	43,649	-14,485	34,767	-7,026	31,358	-7,469	0,443	3,409
31	Junção	46,471	-12,339	37,611	-5,515	34,378	-5,854	0,339	3,233
9	Junção	47,802	-11,159	39,083	-4,543	35,688	-5,123	0,580	3,395
30	Junção	102,144	29,770	98,555	38,782	102,215	37,592	1,190	-3,660
18	Junção	102,594	29,389	98,368	40,316	99,595	39,205	1,111	-1,227
17	Junção	101,190	28,334	98,631	37,517	102,183	36,322	1,195	-3,552
29	Junção	72,192	6,872	67,769	17,827	66,059	17,096	0,731	1,710

1	Junção	71,006	4,802	66,006	15,534	63,503	15,088	0,446	2,503
28	Junção	82,519	16,055	81,106	28,335	77,931	27,321	1,014	3,175
27	Junção	91,178	22,519	89,535	32,637	83,586	32,670	-0,033	5,949
26	Junção	97,440	24,738	95,133	36,977	89,202	37,042	-0,065	5,931
25	Junção	101,797	28,044	99,550	41,103	93,956	41,210	-0,107	5,594
24	Junção	101,675	28,832	97,770	43,419	94,756	42,325	1,094	3,014
23	Junção	102,206	31,896	96,908	43,869	101,157	42,787	1,082	-4,249
22	Junção	103,502	32,000	98,484	44,245	103,259	43,167	1,078	-4,775
21	Junção	106,663	35,255	102,095	46,815	105,159	45,734	1,081	-3,064
20	Junção	109,386	37,846	105,394	47,812	105,475	46,728	1,084	-0,081
19	Junção	107,243	35,017	103,042	45,100	102,110	44,008	1,092	0,932
16	Junção	99,951	24,426	97,977	35,166	100,783	33,962	1,204	-2,806
15	Junção	100,411	22,308	97,985	34,200	100,679	32,992	1,208	-2,694
14	Junção	101,295	23,085	98,553	34,555	101,412	33,406	1,149	-2,859
13	Junção	102,096	23,464	99,024	34,866	102,199	33,784	1,082	-3,175
11	Reservatório de Nível Fixo	-0,010	-0,010	-0,010	-0,010	-0,010	-0,010	0,000	0,000
8	Junção	49,377	-9,203	41,372	-2,970	38,837	-3,510	0,540	2,535
7	Junção	50,412	-7,576	43,089	-1,010	40,771	-1,878	0,868	2,318
6	Junção	51,936	-5,509	45,641	0,433	43,485	0,389	0,044	2,156
5	Junção	54,342	-4,619	50,485	2,129	47,026	1,803	0,326	3,459
4	Junção	58,120	-4,447	54,384	4,507	51,267	3,723	0,784	3,117
3	Junção	64,671	-2,909	59,058	8,949	56,162	8,699	0,250	2,896
2	Junção	67,623	0,695	62,480	11,766	59,824	11,528	0,238	2,656

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

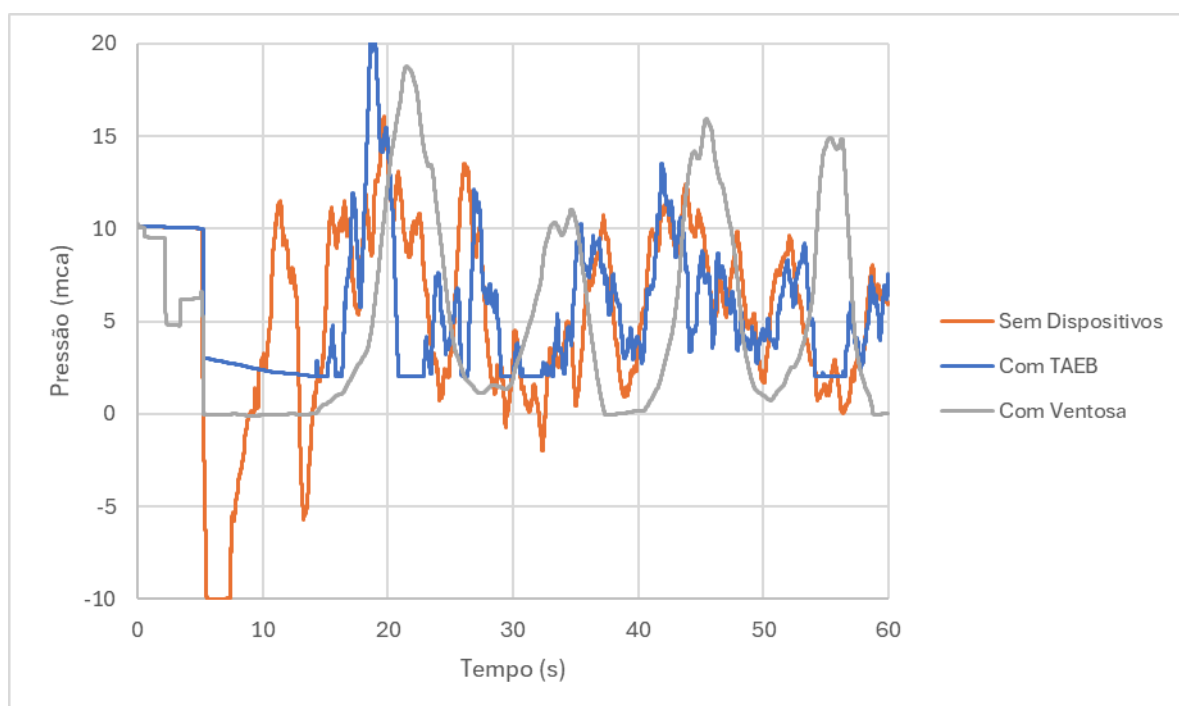
Nota-se que, em relação às subpressões, houve uma diferença média de -1,016 mca de pressão comparando-se, respectivamente, a Simulação sem Dispositivos – MOC Cavitação a Simulação com TAEB – MOC Cavitação, sendo que a segunda trouxe subpressões maiores considerando todos os nós da adutora, o que é um bom indicativo de atenuação de subpressões promovida pelo TAEB. Em termos relativos, o TAEB promoveu uma redução percentual nas subpressões de 15,82%, caracterizando uma situação melhor quando comparada à simulação sem dispositivos. A diferença mais notável foi no próprio nó onde foi inserido o TAEB. Nesse nó, a simulação sem dispositivos gerou uma subpressão de -10,007 mca, correspondente à pressão de vapor da água, enquanto que na simulação com o TAEB, esse valor foi de 2,028 mca, equivalente ao rebaixamento máximo do nível de água obtido no dispositivo. Esse valor foi 120,27% menor que na simulação sem dispositivos. Ao observar a Simulação sem dispositivos – MOC, o nó com a menor subpressão foi o 44, bem próximo ao local onde o TAEB foi instalado.

Já para as sobrepressões, a diferença média entre as duas simulações (Simulação sem dispositivos – MOC Cavitação e Simulação com TAEB – MOC Cavitação) foi de -0,488 mca, demonstrando que o TAEB teve menos influência nas sobrepressões e, de maneira geral, elevou as sobrepressões na adutora, porém com um valor de menos de 1 mca. Relativamente, o TAEB influenciou as sobrepressões trazendo valores 5,83% acima dos valores obtidos na simulação sem dispositivos. O alívio nas sobrepressões gerado pelo TAEB ocorreu nos nós 57, 35, 34, 33, 32, 31, 9, 29, 1, 28, 27, 26, 25, 24, 19, 8, 7, 6, 5, 4, 3 e 2, que correspondem, respectivamente, ao nó da bomba e a nós intermediários da adutora, localizados a montante do TAEB. Destaca-se que o nó com o maior alívio foi o 27, cuja diferença entre as duas simulações foi de 5,949 mca, o que correspondeu a uma redução percentual de 6,64%.

4.1.3. Comparação com Ventosa

No nó do TAEB, foi posicionada uma Ventosa com os mesmos parâmetros da simulação anterior, ou seja, os dados da Tabela 7. Os resultados de pressão na seção do TAEB, gerados após a parada do conjunto motobomba, comparando-se as simulações sem Dispositivos, com TAEB e com Ventosa, podem ser visualizados na Figura 67.

Figura 67 – Comparação da pressão na seção do TAEB nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Ventosa na Adutora da Fazenda Santa Maria



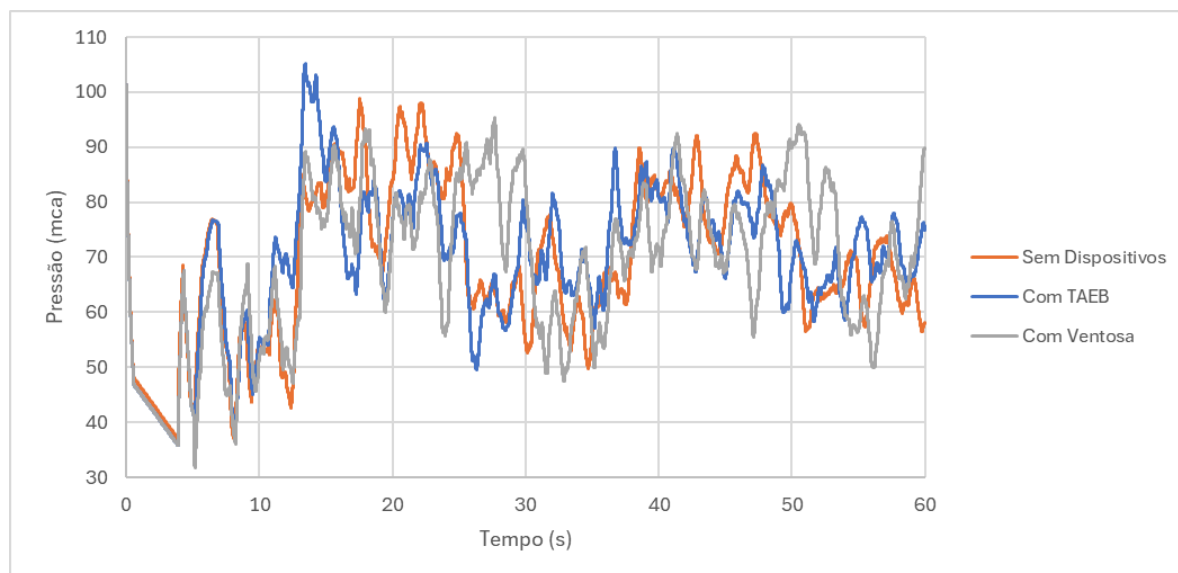
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Nota-se que, comparando o resultado sem nenhum dispositivo e com a Ventosa, houve o combate às subpressões, atingindo o valor mínimo aproximado de 0,00 mca. No entanto, ao comparar esse resultado com o do TAEB, nota-se que o TAEB conseguiu combater as subpressões de maneira mais eficiente, uma vez que houve a elevação de todas as subpressões para o valor mínimo que corresponde ao nível mínimo de água que ocorre no dispositivo.

Além disso, ao longo da simulação, é possível observar que o TAEB atingiu menores valores de sobrepressão do que a Ventosa, com exceção do primeiro pico. O comportamento de menores sobrepressões do TAEB ocorre especialmente a partir de 40 segundos de simulação. Os picos de sobrepressão atingidos pela Ventosa após esse tempo foram de aproximadamente 15,85 mca e 15,00 mca, respectivamente, enquanto que os picos correspondentes obtidos na simulação com o TAEB foram de 13,02 mca e 8,01 mca, obtendo-se uma diferença média de 4,91 mca entre os dois picos de sobrepressão.

Os resultados de pressão na seção da válvula de retenção comparando as simulações sem Dispositivos, com TAEB e com Ventosa estão apresentados na Figura 68.

Figura 68 – Comparação da pressão na seção da válvula de retenção nas situações sem dispositivos, com TAEB e com Ventosa na Adutora da Fazenda Santa Maria



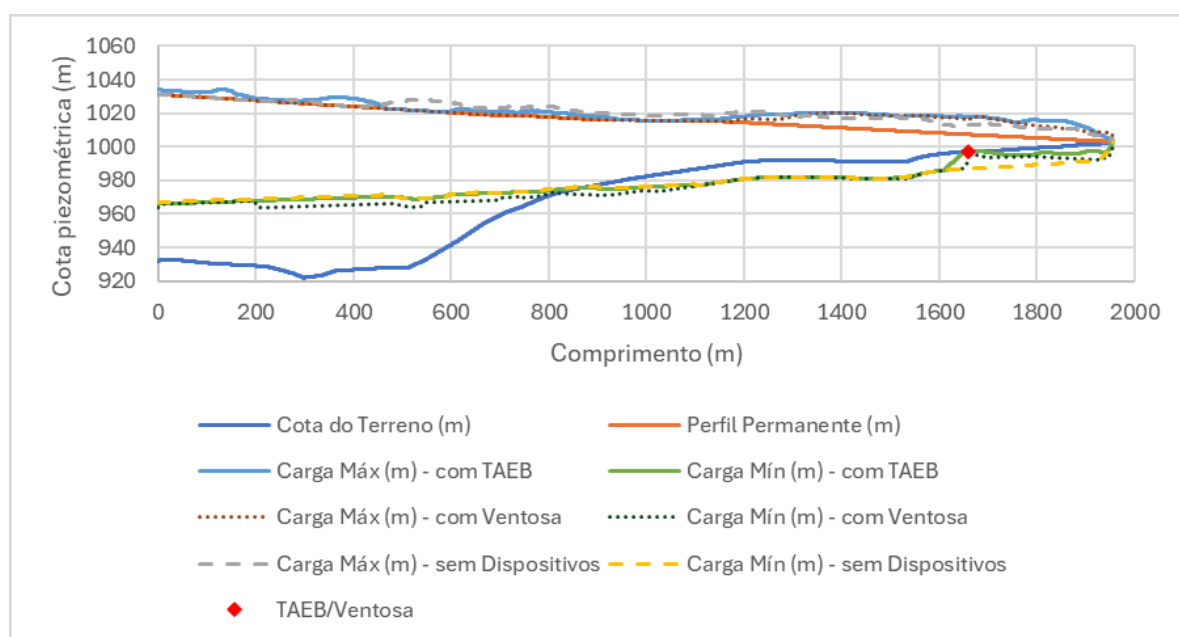
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Já no nó da válvula de retenção, percebe-se que a simulação com a Ventosa promoveu sobrepressões maiores e subpressões menores em alguns instantes quando comparada à situação com o TAEB. Destaca-se que a maior sobrepressão atingida na simulação com a Ventosa foi de 101,210 mca, enquanto que com o TAEB foi de 105,142 mca. Em relação

à subpressão, a Ventosa obteve um valor de 31,783 mca e o TAEB, de 35,727 mca. Dessa forma, percebe-se que o TAEB teve um melhor desempenho no alívio às subpressões quando comparado à Ventosa, porém nas sobrepressões, a Ventosa conseguiu atuar de forma mais eficiente. A diferença entre os dois valores de sobrepressão foi de 3,932 mca.

As envoltórias comparando as situações simuladas sem e com os dispositivos estão na Figura 69.

Figura 69 – Comparação das envoltórias máximas e mínimas nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Ventosa na Adutora da Fazenda Santa Maria



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Nas envoltórias, nota-se que a Ventosa satisfatoriamente combateu às subpressões no ponto onde foi instalada e a jusante desse ponto. Porém, a montante, a atuação da Ventosa reduziu a subpressão para valores abaixo da situação sem dispositivos. Ao comparar com o TAEB, percebe-se que o acréscimo do tubo prolongado preenchido por água consegue sustentar a subpressão a montante dele, algo que representa uma vantagem em relação à Ventosa. Além disso, o TAEB combate as subpressões mais efetivamente que a Ventosa no ponto onde está instalado e a jusante desse ponto. Em termos de sobrepressão, os resultados do TAEB e da Ventosa são bem semelhantes.

A Tabela 29 possibilita uma avaliação quantitativa dos resultados simulados, uma vez que apresenta as informações de pressões máximas e mínimas de cada nó analisado nestas simulações.

Tabela 29 – Pressões máximas e mínimas da Adutora da Fazenda Santa Maria – Comparação com Ventosa

Nós	Contorno	Simulação sem Dispositivos – MOC Cavitação		Simulação com TAEB – MOC Cavitação		Simulação com Ventosa – MOC Cavitação		Comparação – TAEB e Ventosa	
		Pressão Máx (mca)	Pressão Mín (mca)	Pressão Máx (mca)	Pressão Mín (mca)	Pressão Máx (mca)	Pressão Mín (mca)	$\Delta P_{\min}$ (mca)	$\Delta P_{\max}$ (mca)
12	Reservatório de Nível Fixo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
57	Bomba	118,658	36,598	118,601	35,713	118,601	31,751	3,962	0,000
58	Válvula de Retenção	101,210	36,646	105,142	35,728	101,210	31,783	3,945	3,932
55	Junção	1,579	-5,445	1,887	-4,932	5,483	-9,600	4,668	-3,596
10	Junção	0,638	-2,984	0,554	-1,815	5,213	-5,470	3,655	-4,659
54	Junção	3,251	-6,002	3,395	-5,063	6,606	-8,749	3,686	-3,211
53	Junção	3,833	-7,119	4,261	-4,899	6,801	-8,577	3,678	-2,540
52	Junção	6,805	-10,007	9,960	-4,117	7,820	-8,796	4,679	2,140
51	Junção	8,929	-10,007	11,725	-5,007	8,733	-8,300	3,293	2,992
50	Junção	10,627	-10,007	15,241	-4,280	10,999	-6,742	2,462	4,242
49	Junção	11,496	-10,007	16,870	-3,819	13,699	-5,026	1,207	3,171
48	Junção	14,130	-10,007	16,748	-3,139	16,683	-4,283	1,144	0,065
47	Junção	15,965	-10,007	19,530	-1,081	19,281	-3,770	2,689	0,249
46	Junção	16,075	-10,007	20,369	-0,042	20,840	-1,793	1,751	-0,471
45	TAEB/Ventosa	16,112	-10,007	20,611	2,028	18,765	-0,082	2,110	1,846
44	Junção	16,123	-10,007	20,870	-0,096	19,506	-9,155	9,059	1,364
43	Junção	15,849	-10,007	21,352	-4,462	20,277	-10,007	5,545	1,075
42	Junção	19,947	-10,007	23,093	-10,007	22,769	-10,007	0,000	0,324
41	Junção	22,892	-10,007	24,510	-10,007	24,635	-10,007	0,000	-0,125
40	Junção	26,120	-8,861	27,232	-9,021	27,400	-9,936	0,915	-0,168
39	Junção	26,413	-10,007	28,528	-10,007	28,045	-10,007	0,000	0,483
38	Junção	25,580	-9,595	28,953	-9,596	28,776	-9,888	0,292	0,177
37	Junção	26,035	-10,007	28,042	-10,007	28,280	-10,007	0,000	-0,238
36	Junção	26,267	-10,007	27,945	-10,007	26,992	-10,007	0,000	0,953
35	Junção	28,515	-10,007	27,035	-10,007	24,225	-10,007	0,000	2,810
34	Junção	30,094	-10,007	27,222	-10,007	25,508	-10,007	0,000	1,714
33	Junção	30,597	-10,007	27,693	-10,007	26,638	-10,007	0,000	1,055
32	Junção	34,767	-7,026	31,358	-7,469	31,358	-10,007	2,538	0,000
31	Junção	37,611	-5,515	34,378	-5,854	34,378	-8,047	2,193	0,000
9	Junção	39,083	-4,543	35,688	-5,123	35,688	-7,760	2,637	0,000
30	Junção	98,555	38,782	102,215	37,592	98,555	37,592	0,000	3,660
18	Junção	98,368	40,316	99,595	39,205	98,368	35,042	4,163	1,227

17	Junção	98,631	37,517	102,183	36,322	98,631	36,322	0,000	3,552
29	Junção	67,769	17,827	66,059	17,096	63,992	12,881	4,215	2,067
1	Junção	66,006	15,534	63,503	15,088	61,738	10,872	4,216	1,765
28	Junção	81,106	28,335	77,931	27,321	75,706	23,113	4,208	2,225
27	Junção	89,535	32,637	83,586	32,670	83,586	29,868	2,802	0,000
26	Junção	95,133	36,977	89,202	37,042	89,202	34,203	2,839	0,000
25	Junção	99,550	41,103	93,956	41,210	93,956	36,435	4,775	0,000
24	Junção	97,770	43,419	94,756	42,325	94,756	38,164	4,161	0,000
23	Junção	96,908	43,869	101,157	42,787	96,743	38,612	4,175	4,414
22	Junção	98,484	44,245	103,259	43,167	98,485	38,985	4,182	4,774
21	Junção	102,095	46,815	105,159	45,734	101,773	41,553	4,181	3,386
20	Junção	105,394	47,812	105,475	46,728	103,797	42,547	4,181	1,678
19	Junção	103,042	45,100	102,110	44,008	101,647	39,831	4,177	0,463
16	Junção	97,977	35,166	100,783	33,962	97,977	33,962	0,000	2,806
15	Junção	97,985	34,200	100,679	32,992	97,985	32,451	0,541	2,694
14	Junção	98,553	34,555	101,412	33,406	98,553	32,105	1,301	2,859
13	Junção	99,024	34,866	102,199	33,784	99,024	31,729	2,055	3,175
11	Reservatório de Nível Fixo	-0,010	-0,010	-0,010	-0,010	-0,010	-0,010	0,000	0,000
8	Junção	41,372	-2,970	38,837	-3,510	37,538	-7,137	3,627	1,299
7	Junção	43,089	-1,010	40,771	-1,878	38,988	-5,918	4,040	1,783
6	Junção	45,641	0,433	43,485	0,389	41,209	-3,756	4,145	2,276
5	Junção	50,485	2,129	47,026	1,803	44,508	-0,563	2,366	2,518
4	Junção	54,384	4,507	51,267	3,723	48,122	1,556	2,167	3,145
3	Junção	59,058	8,949	56,162	8,699	54,180	6,270	2,429	1,982
2	Junção	62,480	11,766	59,824	11,528	57,624	8,741	2,787	2,200

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Comparando-se a Simulação com TAEB – MOC Cavitação e a Simulação com Ventosa – MOC Cavitação em relação às subpressões, o TAEB permitiu um alívio maior. Em média, a diferença entre as subpressões da simulação com o TAEB e com a Ventosa, respectivamente, em todos os nós analisados, foi de 2,524 mca. Destaca-se que o nó onde a diferença foi a maior observada é o 44, ou seja, logo a montante do TAEB. Essa diferença se dá pela atuação do TAEB na subpressão de maneira significativa a jusante de onde está instalado, enquanto que a Ventosa afetou as envoltórias de mínimas pressões também a montante do nó. Relativamente, a Ventosa reduziu as subpressões em 36,87% considerando todos os nós da adutora, ou seja, o TAEB conseguiu combater as subpressões de forma mais efetiva que a Ventosa.

Já para as sobrepressões, a diferença média entre as duas simulações (com TAEB e com Ventosa, respectivamente) foi de 1,220 mca, mostrando, em geral, pouca divergência da adoção dos dois dispositivos para o alívio de sobrepressão. Nos nós onde o TAEB promoveu alívio nas sobrepressões (57, 35, 34, 33, 32, 31, 9, 29, 1, 28, 27, 26, 25, 24, 19, 8, 7, 6, 5, 4, 3 e 2), a Ventosa foi mais eficiente, pois gerou um alívio em média 1,260 mca a mais que o TAEB. Quando a análise é estendida para todos os nós da adutora, a Ventosa foi mais eficiente que o TAEB. Porém, relativamente, a Ventosa promoveu um aumento de 21,23% de pressões máximas considerando todos os nós da adutora e aliviou a sobrepressão em 7,89% nos nós onde o TAEB foi efetivo no combate às sobrepressões. Assim, considerando todos os nós da adutora, o TAEB foi mais efetivo que a Ventosa. Complementarmente, observa-se que o ganho no combate às sobrepressões promovido pela Ventosa não é efetivamente mais significativo que o promovido pelo TAEB.

Portanto, comparando-se os dois dispositivos, pela vantagem do TAEB no alívio das subpressões, ele se mostrou um dispositivo mais eficiente que a Ventosa para essa adutora.

4.1.4. Comparação com Chaminé de Equilíbrio

No mesmo nó onde foram testados os dois dispositivos, foi posicionada uma Chaminé de Equilíbrio. A partir do pré-dimensionamento do UFC 7, a Chaminé de Equilíbrio foi simulada com os dados de entrada presentes na Tabela 30.

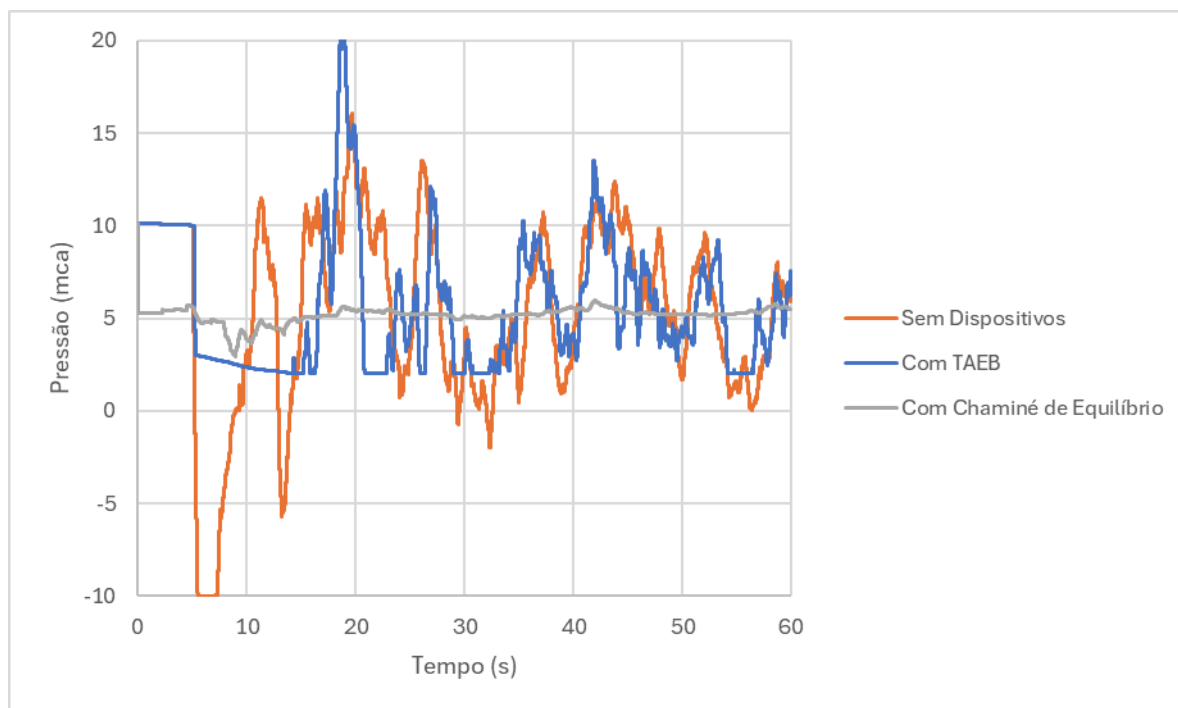
Tabela 30 – Dados da Chaminé de Equilíbrio simulada na Adutora da Fazenda Santa Maria

Dados de entrada da Chaminé de Equilíbrio	
Diâmetro (m)	2,00
Nível Máximo de Água (m)	5,20
Coefficiente de Perda Localizada	3,10

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Dessa forma, a Figura 70 apresenta os resultados da simulação da parada do conjunto motobomba na seção do TAEB, considerando as situações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio.

Figura 70 – Comparação da pressão na seção do TAEB nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio na Adutora da Fazenda Santa Maria

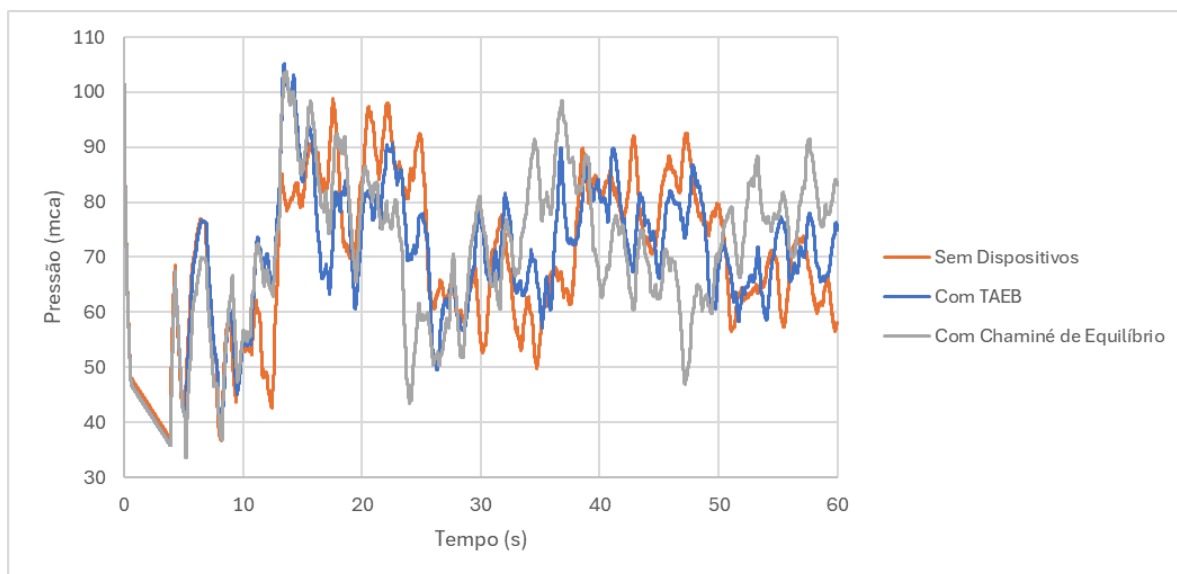


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Nota-se que a Chaminé de Equilíbrio consegue sustentar a pressão de forma bastante eficiente, mantendo-a aproximadamente no mesmo valor de seu nível máximo, ou seja, 5,20 mca. Em média, a pressão durante toda a simulação com a Chaminé foi de 5,173 mca. O TAEB, por sua vez, impede que as subpressões fiquem abaixo do seu nível máximo de rebaixamento, ou seja, a pressão nunca fica abaixo de 2,03 mca. Todavia, o TAEB não tem o mesmo efeito que a Chaminé em termos de sobrepressões, ou seja, ainda ocorrem picos durante o tempo de simulação que são completamente neutralizados pela atuação da Chaminé de Equilíbrio.

Na seção da válvula de retenção, a Figura 71 apresenta o comportamento para as pressões, considerando as situações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio.

Figura 71 – Comparação da pressão na seção da válvula de retenção nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio na Adutora da Fazenda Santa Maria



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Observa-se que não há grandes diferenças na atuação dos dois dispositivos. Inclusive, em alguns instantes de simulação, o TAEB foi mais efetivo que a Chaminé. Podem-se citar o tempo de aproximadamente 37 segundos, em que a pressão obtida pela simulação com a Chaminé foi em torno de 97,326 mca, enquanto que com o TAEB, nesse mesmo instante, obteve-se 84,788 mca, ou seja, uma sobrepressão 12,538 mca menor. Também é possível citar o instante quando a simulação atinge 47 segundos, em que a subpressão obtida pela Chaminé foi de 47,070 mca e com o TAEB, foi de 73,605, ou seja, o TAEB promoveu um alívio na subpressão 26,535 mca acima em relação à Chaminé de Equilíbrio.

As simulações da adutora sem Dispositivos, com o TAEB e com a Chaminé geraram as envoltórias apresentadas na Figura 72.

57	Bomba	118,658	36,598	118,601	35,713	118,601	33,540	2,173	0,000
58	Válvula de Retenção	101,210	36,646	105,142	35,728	103,735	33,573	2,155	1,407
55	Junção	1,579	-5,445	1,887	-4,932	0,369	-4,193	-0,739	1,518
10	Junção	0,638	-2,984	0,554	-1,815	0,129	-4,150	2,335	0,425
54	Junção	3,251	-6,002	3,395	-5,063	1,544	-3,090	-1,973	1,851
53	Junção	3,833	-7,119	4,261	-4,899	1,771	-2,914	-1,985	2,490
52	Junção	6,805	-10,007	9,960	-4,117	3,067	-2,048	-2,069	6,893
51	Junção	8,929	-10,007	11,725	-5,007	3,477	-1,576	-3,431	8,248
50	Junção	10,627	-10,007	15,241	-4,280	4,509	-0,101	-4,179	10,732
49	Junção	11,496	-10,007	16,870	-3,819	6,129	1,190	-5,009	10,741
48	Junção	14,130	-10,007	16,748	-3,139	7,783	1,989	-5,128	8,965
47	Junção	15,965	-10,007	19,530	-1,081	9,169	2,807	-3,888	10,361
46	Junção	16,075	-10,007	20,369	-0,042	9,819	2,942	-2,984	10,550
45	TAEB/ Chaminé de Equilíbrio	16,112	-10,007	20,611	2,028	10,110	2,947	-0,919	10,501
44	Junção	16,123	-10,007	20,870	-0,096	10,325	-0,075	-0,021	10,545
43	Junção	15,849	-10,007	21,352	-4,462	11,445	-4,949	0,487	9,907
42	Junção	19,947	-10,007	23,093	-10,007	16,714	-10,007	0,000	6,379
41	Junção	22,892	-10,007	24,510	-10,007	19,143	-10,007	0,000	5,367
40	Junção	26,120	-8,861	27,232	-9,021	24,109	-9,532	0,511	3,123
39	Junção	26,413	-10,007	28,528	-10,007	25,715	-10,007	0,000	2,813
38	Junção	25,580	-9,595	28,953	-9,596	24,538	-9,713	0,117	4,415
37	Junção	26,035	-10,007	28,042	-10,007	26,055	-10,007	0,000	1,987
36	Junção	26,267	-10,007	27,945	-10,007	26,202	-10,007	0,000	1,743
35	Junção	28,515	-10,007	27,035	-10,007	27,718	-10,007	0,000	-0,683
34	Junção	30,094	-10,007	27,222	-10,007	29,661	-10,007	0,000	-2,439
33	Junção	30,597	-10,007	27,693	-10,007	29,874	-10,007	0,000	-2,181
32	Junção	34,767	-7,026	31,358	-7,469	34,676	-9,648	2,179	-3,318
31	Junção	37,611	-5,515	34,378	-5,854	36,577	-7,132	1,278	-2,199
9	Junção	39,083	-4,543	35,688	-5,123	37,408	-6,744	1,621	-1,720
30	Junção	98,555	38,782	102,215	37,592	99,453	37,592	0,000	2,762
18	Junção	98,368	40,316	99,595	39,205	99,942	35,938	3,267	-0,347
17	Junção	98,631	37,517	102,183	36,322	101,258	36,322	0,000	0,925
29	Junção	67,769	17,827	66,059	17,096	70,976	13,788	3,308	-4,917
1	Junção	66,006	15,534	63,503	15,088	68,675	11,779	3,309	-5,172
28	Junção	81,106	28,335	77,931	27,321	81,692	24,018	3,303	-3,761
27	Junção	89,535	32,637	83,586	32,670	85,473	30,771	1,899	-1,887
26	Junção	95,133	36,977	89,202	37,042	90,718	35,575	1,467	-1,516
25	Junção	99,550	41,103	93,956	41,210	96,755	37,446	3,764	-2,799
24	Junção	97,770	43,419	94,756	42,325	98,018	39,065	3,260	-3,262
23	Junção	96,908	43,869	101,157	42,787	102,477	39,511	3,276	-1,320

22	Junção	98,484	44,245	103,259	43,167	104,534	39,883	3,284	-1,275
21	Junção	102,095	46,815	105,159	45,734	107,298	42,450	3,284	-2,139
20	Junção	105,394	47,812	105,475	46,728	107,238	43,444	3,284	-1,763
19	Junção	103,042	45,100	102,110	44,008	104,183	40,728	3,280	-2,073
16	Junção	97,977	35,166	100,783	33,962	99,953	33,962	0,000	0,830
15	Junção	97,985	34,200	100,679	32,992	100,113	32,992	0,000	0,566
14	Junção	98,553	34,555	101,412	33,406	100,411	33,406	0,000	1,001
13	Junção	99,024	34,866	102,199	33,784	100,933	33,555	0,229	1,266
11	Reservatório de Nível Fixo	-0,010	-0,010	-0,010	-0,010	-0,010	-0,010	0,000	0,000
8	Junção	41,372	-2,970	38,837	-3,510	40,415	-5,596	2,086	-1,578
7	Junção	43,089	-1,010	40,771	-1,878	43,032	-4,608	2,730	-2,261
6	Junção	45,641	0,433	43,485	0,389	46,882	-2,602	2,991	-3,397
5	Junção	50,485	2,129	47,026	1,803	51,070	1,333	0,470	-4,044
4	Junção	54,384	4,507	51,267	3,723	55,870	2,577	1,146	-4,603
3	Junção	59,058	8,949	56,162	8,699	61,551	6,906	1,793	-5,389
2	Junção	62,480	11,766	59,824	11,528	65,088	9,377	2,151	-5,264

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Comparando-se a Simulação com TAEB – MOC Cavitação e a Simulação com Chaminé de Equilíbrio – MOC Cavitação em relação às subpressões, o TAEB permitiu um alívio maior. A diferença média entre as subpressões da simulação com o TAEB e com a Chaminé de Equilíbrio, respectivamente, em todos os nós analisados, foi de 0,598 mca. A Chaminé, por sua vez, promoveu subpressões 8,15% a mais que na situação sem dispositivos. Destaca-se que o nó onde a diferença foi a maior observada é o 25, que fica posicionado a montante dos dispositivos. Essa diferença foi de 3,764 mca.

Já para as sobrepressões, a diferença média entre as duas simulações (com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio, respectivamente) foi de 1,176 mca, demonstrando que a Chaminé teve uma atuação levemente melhor em comparação com TAEB. Nos nós onde o TAEB promoveu alívio nas sobrepressões (57, 35, 34, 33, 32, 31, 9, 29, 1, 28, 27, 26, 25, 24, 19, 8, 7, 6, 5, 4, 3 e 2), o TAEB foi mais eficiente, pois gerou um alívio em média 2,879 mca a mais que a Chaminé. Por outro lado, a Chaminé promoveu um alívio nas sobrepressões de 12,96% em comparação com a situação sem dispositivos.

Portanto, comparando-se os dois dispositivos, o TAEB demonstrou ser mais eficiente que a Chaminé no combate às subpressões, enquanto que a Chaminé foi mais eficiente no alívio das sobrepressões. Ressalta-se, ainda, que o TAEB possui a grande vantagem de ser

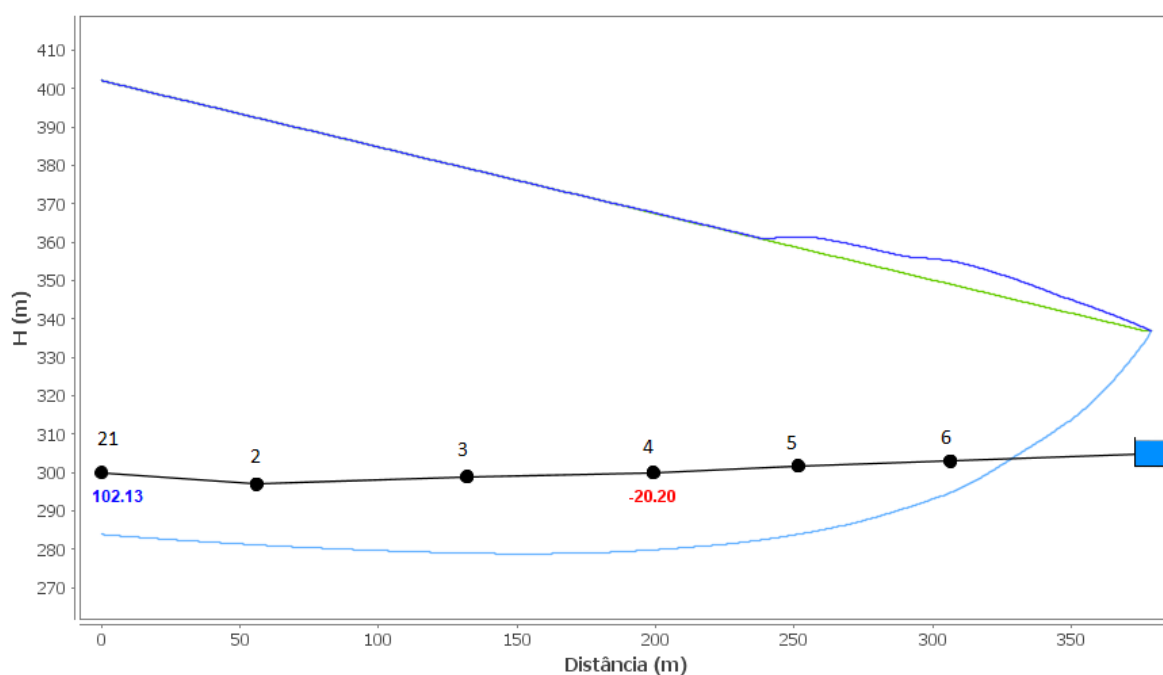
um dispositivo com dimensões bastante reduzidas em relação à Chaminé que foi utilizada na simulação, o que o torna mais interessante em termos de custos de implantação.

4.2. Adutora de Aurora/CE

4.2.1. Comparação com Situação sem Dispositivos de Proteção

A simulação sem nenhum dispositivo de alívio possibilitou a locação do TAEB no nó de menor subpressão, conforme Figura 73.

Figura 73 – Simulação da Adutora de Aurora/CE com o MOC no UFC 7 sem dispositivos de proteção



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Assim, o nó adotado para o posicionamento do TAEB foi o 4, cujo resultado de pressão mínima foi de -20,20 mca. Foi realizada uma simulação considerando o TAEB com os dados apresentados na Tabela 32.

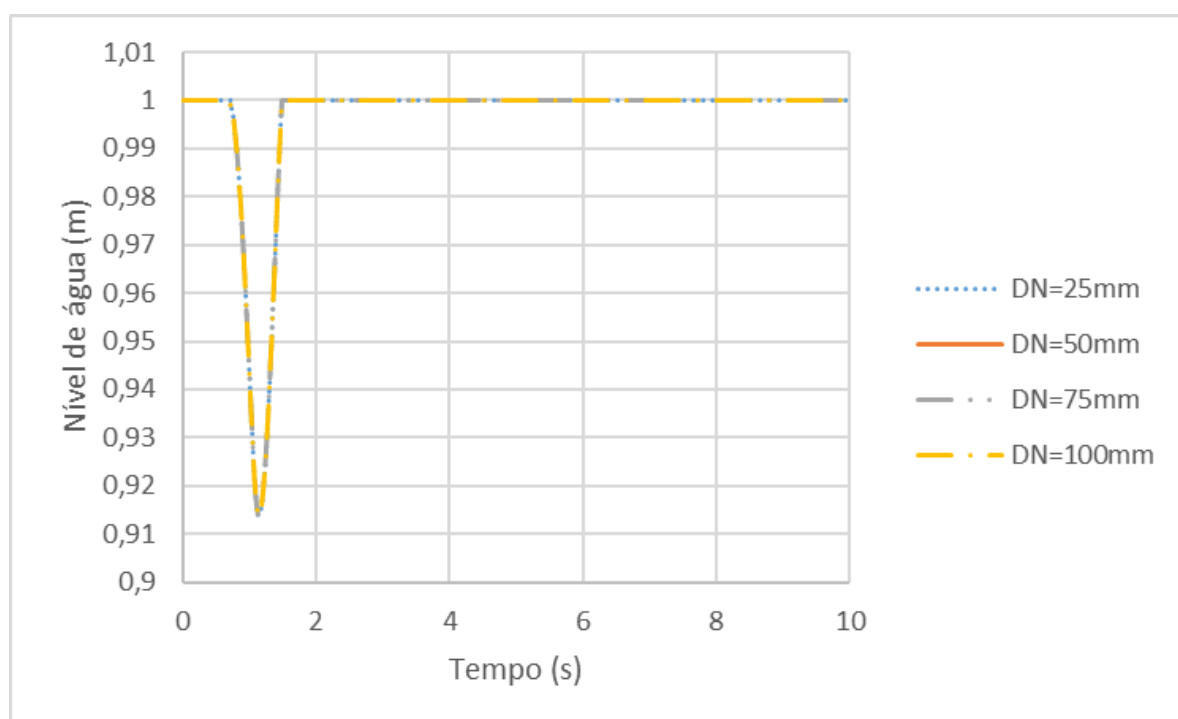
Tabela 32 – Dados do TAEB simulado na Adutora de Aurora/CE

Dados de entrada do TAEB	
Diâmetro (mm)	100
Comprimento (m)	1,0
Coefficiente de Perda Localizada	5,50

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para a escolha do diâmetro da Ventosa, foram simulados dispositivos com diâmetros nominais de 25, 50, 75 e 100 mm. A partir da simulação do UFC 7 com o modelo de cavitação, foram gerados os resultados de oscilação de nível de água no TAEB, conforme apresentado na Figura 74.

Figura 74 – Nível de água no TAEB para cada diâmetro de Ventosa simulado ao longo do tempo de simulação no UFC 7 na Adutora de Aurora/CE



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O gráfico demonstra que, mesmo aumentando o diâmetro das Ventosas simuladas, não ocorre diferença na atuação em relação à oscilação do nível de água na estrutura do TAEB. Portanto, foi adotada a Ventosa de 25 mm pelo fato de ela ser mais economicamente acessível que as outras com diâmetros maiores. Para a simulação, foram ainda adotados os parâmetros apresentados na Tabela 33.

Tabela 33 – Dados da Ventosa do TAEB simulado na Adutora de Aurora/CE

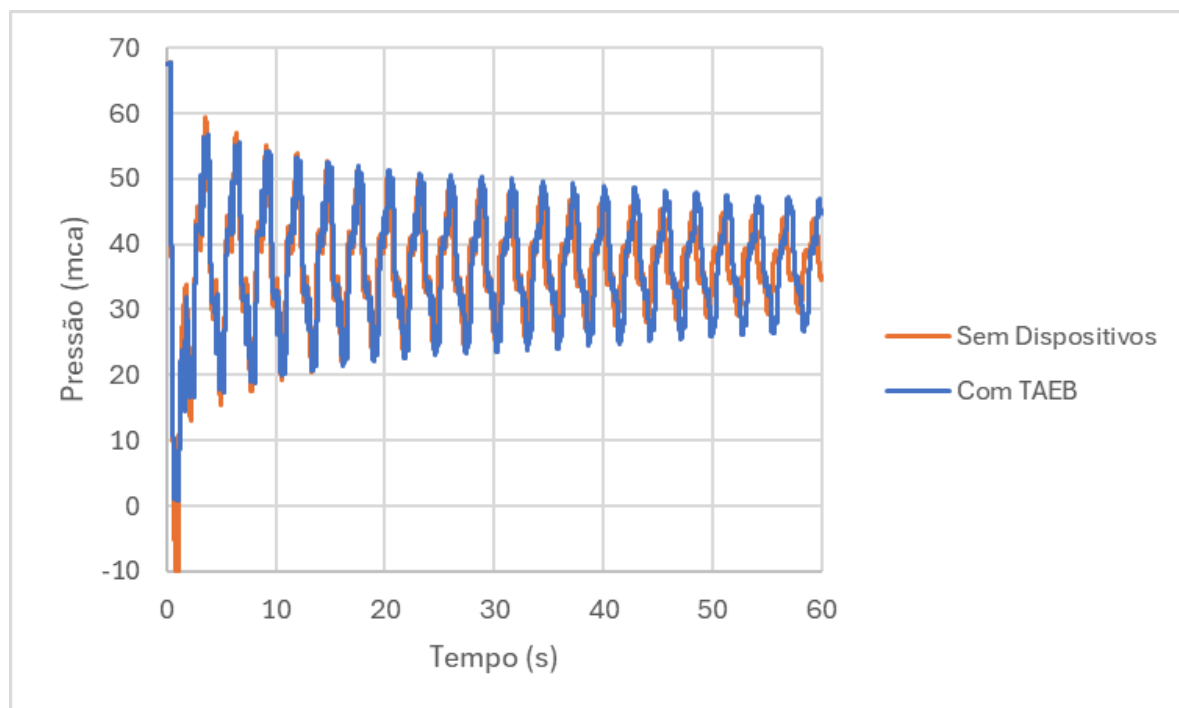
Dados de entrada da Ventosa do TAEB	
Diâmetro da Ventosa (mm)	25
Área do Orifício Cinético (mm ²)	506,70
Coeficiente de Admissão de Ar	0,590
Coeficiente de Expulsão de Ar	0,990
Temperatura Interna (°C)	25,00
Temperatura Externa (°C)	24,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Além disso, também se infere do gráfico da Figura 74 que o TAEB atuou praticamente no início da simulação (por volta de 1 segundo), pois é o tempo que leva para que a onda de subpressão atinja o dispositivo, pois a adutora tem um comprimento bastante reduzido. Além disso, a atuação do TAEB é bem menor quando comparada com a Adutora da Fazenda Santa Maria, devido ao fato de que a vazão e o desnível geométrico terem ordem de grandeza 10 vezes menor que na primeira simulação. Assim, nesse segundo caso, o TAEB atua reduzindo seu nível de água por cerca de 9 cm e logo se estabiliza novamente no nível inicial. Também não são notadas oscilações no nível de água após o retorno ao nível de água inicial, devido à baixa vazão presente nesta adutora.

Em termos de pressões na seção onde o TAEB foi posicionado, foi elaborada a Figura 75, que traz a comparação entre a simulação sem Dispositivos e com TAEB.

Figura 75 – Comparação da pressão na seção do TAEB nas situações sem Dispositivos e com TAEB na Adutora de Aurora/CE



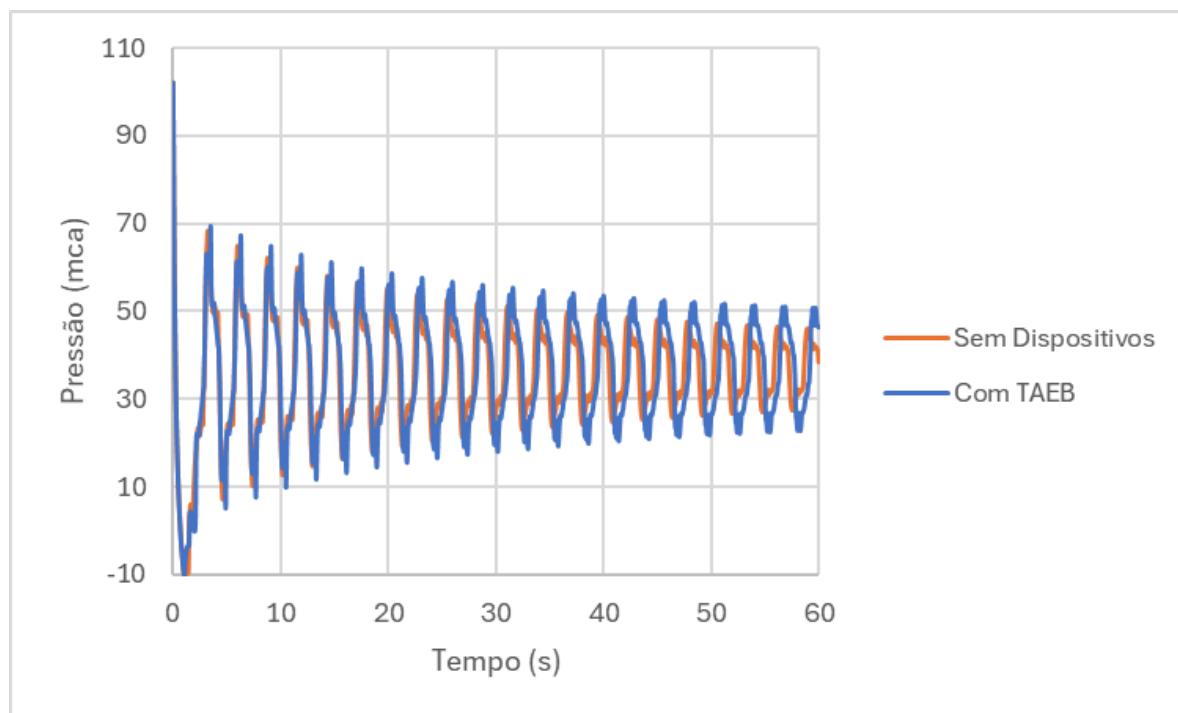
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O TAEB limitou a pressão à altura do nível mínimo de água obtido na simulação, que correspondeu a aproximadamente 0,91 m. Ademais, nota-se que os picos de subpressão do início da simulação são menores após a inserção do TAEB na adutora. Mais próximo do final da simulação, o TAEB trouxe picos de subpressão aproximadamente 2 mca maiores que a situação sem dispositivos. Porém, o TAEB atuou de maneira significativa nos primeiros picos de subpressão. Em relação às sobrepressões, ocorre algo semelhante. O TAEB atuou efetivamente nos primeiros picos, mas gerou picos aproximadamente 1 mca maiores que a situação sem dispositivos.

O instante em que o TAEB começa a atuar coincide com o alcance do nível mínimo de água conforme ilustrado no gráfico da Figura 74.

Em termos de pressão na válvula de retenção, foram gerados os resultados apresentados na Figura 76, que traz um comparativo entre a simulação sem Dispositivos e com TAEB.

Figura 76 – Comparação da pressão na seção da válvula de retenção nas situações sem Dispositivos e com TAEB na Adutora de Aurora/CE

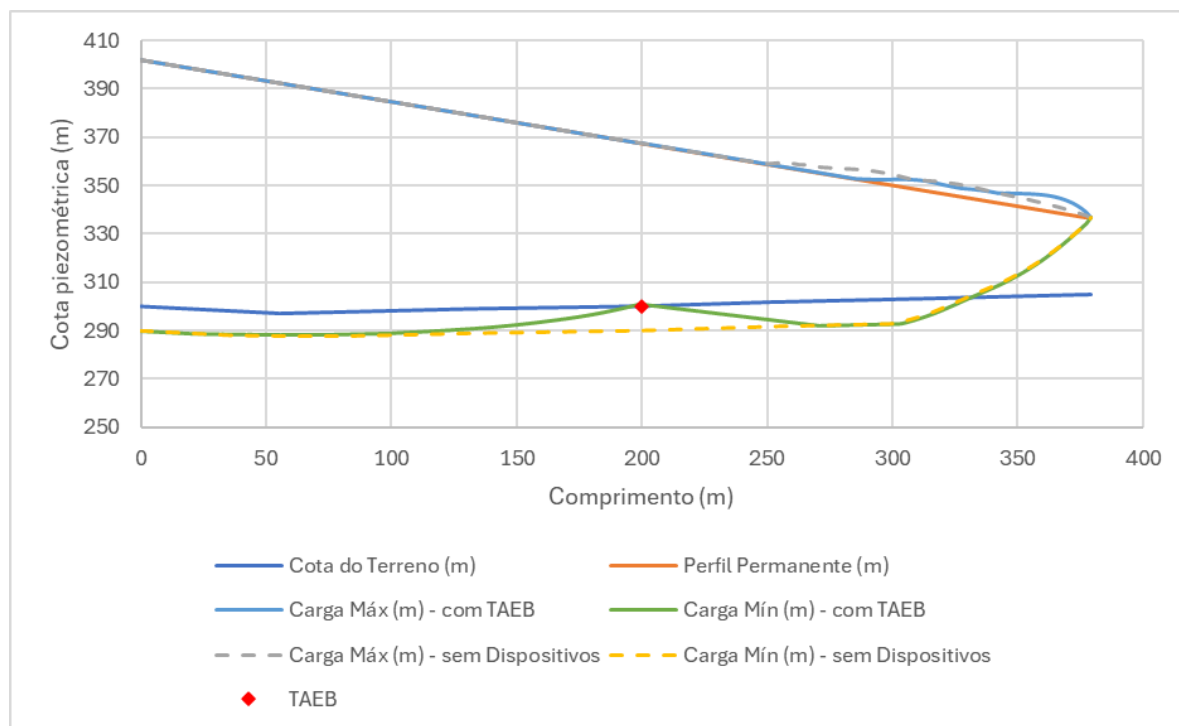


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Pelo fato de a adutora ter um comprimento reduzido e pela baixa vazão, há pouca influência nas pressões da válvula de retenção, uma vez que o efeito do TAEB não foi significativo nesta adutora, reduzindo apenas 9 cm de água em relação a 1,00 m disponível. No entanto, de maneira geral, as pressões positivas e negativas foram levemente menores na situação com o TAEB, resultando em uma diferença média de 0,04 mca em todos os instantes da simulação. Além disso, o TAEB trouxe picos maiores de subpressão e sobrepressão nos instantes finais da simulação.

Para fins de comparação entre as envoltórias geradas pelas duas simulações, foi elaborada a Figura 77.

Figura 77 – Comparação das envoltórias máximas e mínimas nas situações sem Dispositivos e com TAEB na Adutora de Aurora/CE



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Percebe-se a influência do TAEB na envoltória de subpressão. Na região a montante do TAEB, devido ao acréscimo de coluna de água de 1,00 metro com a inserção do dispositivo em comparação aos 9,84 metros de desnível geométrico desta adutora, começa a elevação da envoltória até atingir uma cota piezométrica que corresponde ao nível do terreno acrescida do rebaixamento atingido no dispositivo. Após esse ponto, a envoltória volta a ficar abaixo do terreno e, por volta de 275 metros, volta a coincidir com a situação sem o TAEB. A partir do retorno da onda de pressão após o choque com o reservatório de jusante, ocorre a influência do TAEB nas envoltórias de sobrepressão. O TAEB afeta essa envoltória minimamente, ocasionando valores ligeiramente maiores nos pontos a jusante do dispositivo. Entretanto, a partir do início da adutora até aproximadamente 275 metros de sua extensão, as envoltórias de máxima e o perfil permanente coincidem na simulação com o TAEB, apresentando uma melhora em comparação à situação sem dispositivos, que apresenta esse comportamento do início até 250 metros de extensão da adutora, aproximadamente.

A Tabela 34 apresenta o resumo dos resultados de pressões máximas e mínimas obtidas nas simulações para essa adutora.

Tabela 34 – Pressões máximas e mínimas da Adutora de Aurora/CE

Nós	Contorno	Simulação sem Dispositivos – MOC		Simulação sem dispositivos – MOC Cavitação		Simulação com TAEB – MOC Cavitação		Comparação – Sem dispositivos e TAEB	
		Pressão Máx (mca)	Pressão Mín (mca)	Pressão Máx (mca)	Pressão Mín (mca)	Pressão Máx (mca)	Pressão Mín (mca)	$\Delta P_{\min}$ (mca)	$\Delta P_{\max}$ (mca)
16	Junção	-0,504	-5,785	-0,653	-5,830	-0,705	-7,366	1,536	0,052
15	Bomba	102,130	-16,205	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
14	Bomba	102,130	-16,205	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
13	Bomba	102,130	-16,205	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
12	Bomba	102,130	-16,205	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
1	Reservatório de Nível Fixo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
17	Válvula de Retenção	102,130	-16,155	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
21	Junção	102,130	-16,128	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
19	Válvula de Retenção	102,130	-16,155	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
18	Válvula de Retenção	102,130	-16,155	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
20	Válvula de Retenção	102,130	-16,155	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
2	Junção	95,405	-15,899	95,405	-9,221	95,405	-8,613	-0,608	0,000
3	Junção	80,335	-19,942	80,348	-10,007	80,333	-7,983	-2,024	0,015
4	TAEB	67,715	-20,200	67,733	-10,007	67,645	0,914	-10,921	0,088
5	Junção	59,722	-17,829	57,533	-10,007	57,033	-7,125	-2,882	0,500
6	Junção	52,131	-8,252	49,998	-8,494	49,611	-9,172	0,678	0,387
22	Junção	32,776	29,487	32,923	29,362	34,348	29,346	0,016	-1,425
7	Reservatório de Nível Fixo	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000	0,000	0,000

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

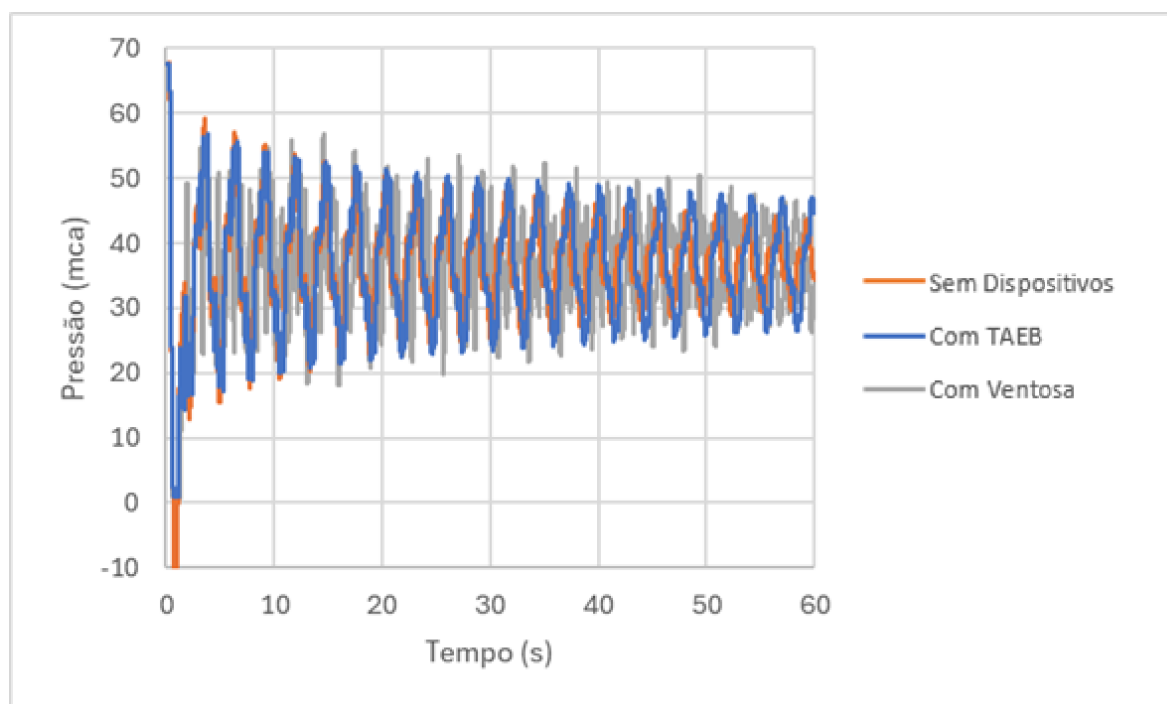
Para essa adutora em relação às subpressões, houve uma diferença média de -0,789 mca de alívio promovido pelo acréscimo do TAEB considerando todos os nós da adutora, comparando-se a Simulação sem dispositivos – MOC Cavitação e a Simulação com TAEB – MOC Cavitação. A maior diferença de subpressões foi no nó onde o TAEB foi inserido, resultando em um alívio de -10,921 mca, resultante da diferença entre -10,007 mca e 0,914 mca, sendo este último valor correspondente ao rebaixamento máximo alcançado no TAEB na simulação. Relativamente, o TAEB trouxe uma redução percentual de 7,67% nas subpressões comparando-se com a simulação sem dispositivos.

Já para as sobrepressões, a diferença média entre as duas simulações foi de -0,021 mca, ou seja, houve pouca influência nas sobrepressões após o acréscimo do TAEB. Em quase todos os nós, a diferença entre as duas simulações foi igual a zero, com exceção dos nós 16, 3, 4, 5, 6 e 22, que são, respectivamente, o nó a montante das bombas e nós intermediários da adutora. O TAEB, nessa simulação, provocou um aumento de 0,32% nas sobrepressões em relação à simulação sem dispositivos.

4.2.2. Comparação com Ventosa

Utilizando, no mesmo nó do TAEB, a Ventosa com os dados da Tabela 33, obtiveram-se os resultados de pressão na seção dos dispositivos apresentados na Figura 78, sendo possível realizar a comparação entre as simulações sem Dispositivos, com TAEB e com Ventosa.

Figura 78 – Comparação da pressão na seção do TAEB nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Ventosa na Adutora de Aurora/CE



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

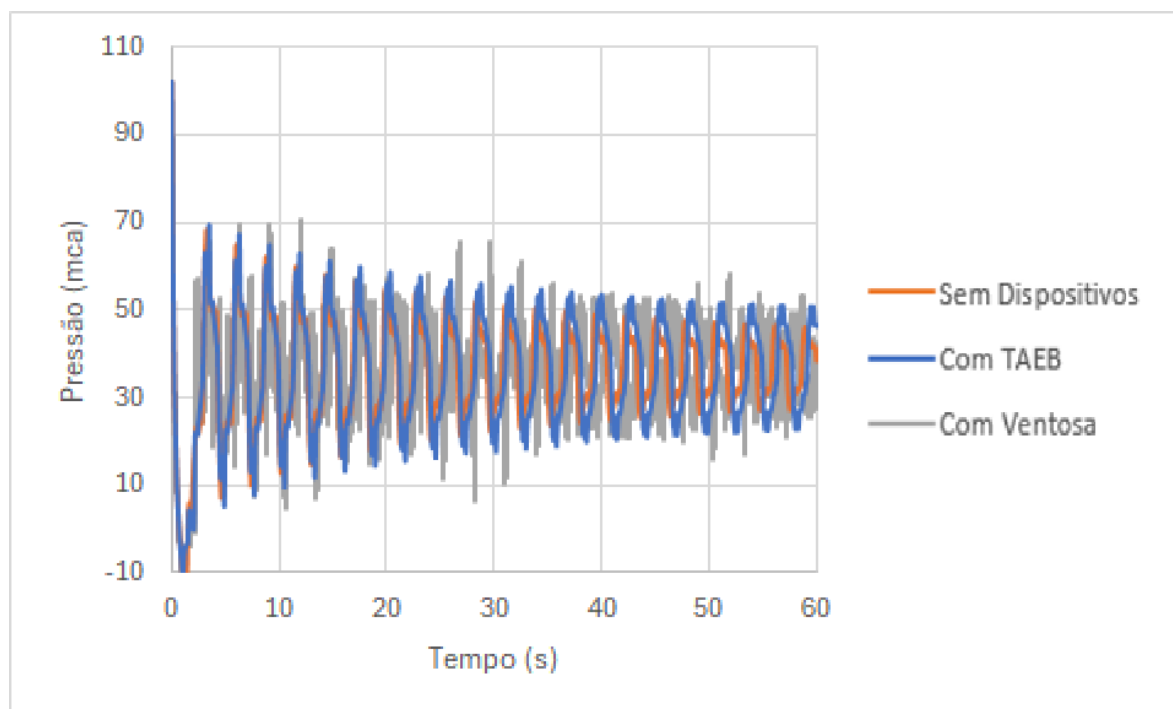
Percebe-se que a principal vantagem da inclusão do tubo prolongado presente no TAEB foi o ganho de estabilidade na simulação. Os picos de pressão oscilam bastante na simulação com a Ventosa, quase sempre atingindo valores de subpressão e sobrepressão,

respectivamente, menores e maiores que na simulação com o TAEB, especialmente a partir de aproximadamente 15 segundos de simulação.

Ademais, na simulação com o TAEB, a menor pressão atingida é maior que na simulação com a Ventosa, devido à elevação desse valor correspondente ao rebaixamento máximo atingido no dispositivo. A menor pressão atingida na simulação com o TAEB foi de 0,914 mca e, com a Ventosa, -0,03 mca.

A parada do conjunto motobomba gerou, na seção da válvula de retenção, os resultados presentes na Figura 79, que também ilustra a comparação entre as simulações sem Dispositivos, com TAEB e com Ventosa.

Figura 79 – Comparação da pressão na seção da válvula de retenção nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Ventosa na Adutora de Aurora/CE



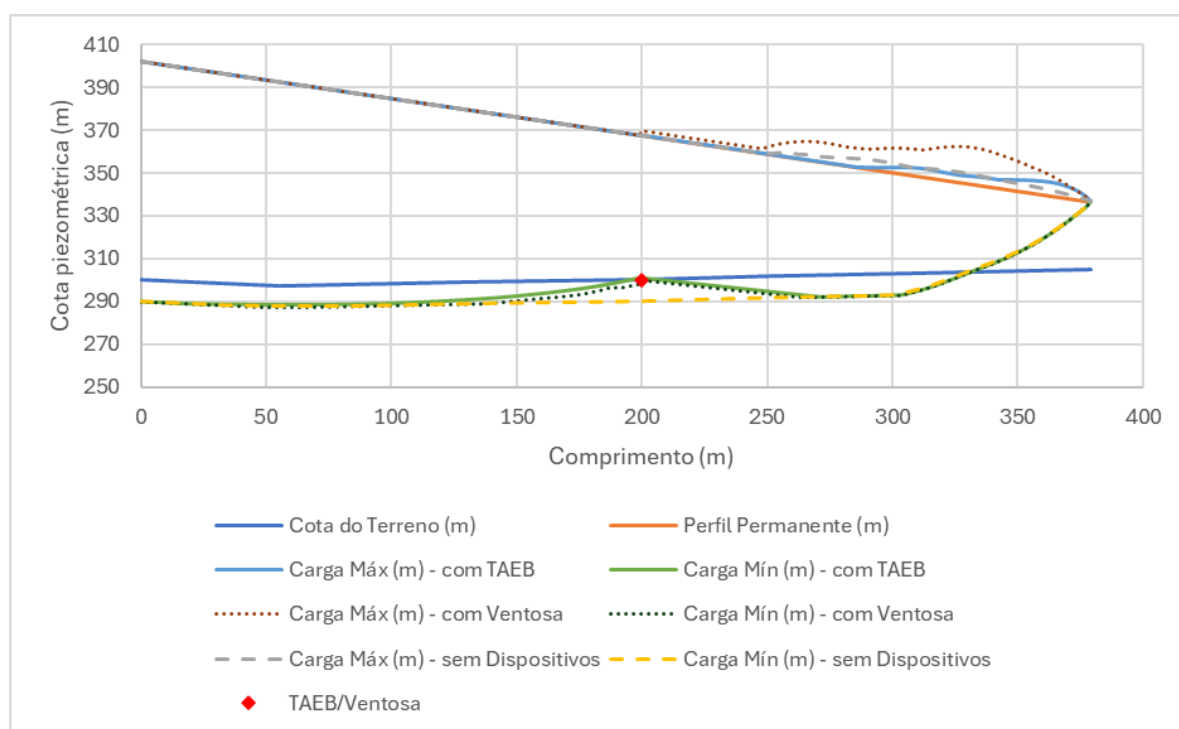
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Na seção da válvula de retenção, notam-se picos de pressão bastante expressivos na simulação realizada com a Ventosa. Essa situação é bastante diferente quando foi inserido o TAEB nesse nó, devido à estabilidade que o acréscimo tubo prolongado preenchido com água promove. Após o início da oscilação das ondas de pressão, a maior pressão obtida na simulação com a Ventosa foi de 70,330 mca, no instante em que a simulação atingiu 12 segundos. Nesse mesmo instante, a simulação com o TAEB gerou uma pressão de 53,715 mca, ou seja, houve uma diferença de 16,615 mca comparando-se os resultados dos dois dispositivos. Já para as

subpressões, a inserção da Ventosa obteve um valor mínimo de 6,962 mca após 28 segundos do início da simulação, sendo que o valor obtido na simulação com o TAEB, considerando o pico correspondente, o valor de pressão foi de 18,699 mca, ou seja, o TAEB promoveu um alívio 11,737 mca acima em relação à Ventosa nesse instante da simulação.

Para fins de comparação entre as envoltórias das três simulações, foi gerada a Figura 80.

Figura 80 – Comparação das envoltórias máximas e mínimas nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Ventosa na Adutora de Aurora/CE



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Em relação às envoltórias, nota-se que a simulação com o TAEB promoveu resultados mais satisfatórios tanto para as sobrepressões como para as subpressões. Nessa simulação, o principal ganho do acréscimo do tubo prolongado à Ventosa foi a maior estabilidade nos resultados. Na simulação com a Ventosa, as subpressões obtidas pelos dispositivos foram praticamente as mesmas, sendo que a simulação com o TAEB resultou em subpressões levemente maiores, provocadas pelo acréscimo do tubo prolongado preenchido com água, o que resultou na elevação da coluna líquida no nó onde ele foi inserido.

Em termos quantitativos, é possível realizar a análise dos resultados obtidos entre todas as simulações a partir dos dados apresentados na Tabela 35.

Tabela 35 – Pressões máximas e mínimas da Adutora de Aurora/CE – Comparação com Ventosa

Nós	Contorno	Simulação sem Dispositivos – MOC Cavitação		Simulação com TAEB – MOC Cavitação		Simulação com Ventosa – MOC Cavitação		Comparação – TAEB e Ventosa	
		Pressão Máx (mca)	Pressão Mín (mca)	Pressão Máx (mca)	Pressão Mín (mca)	Pressão Máx (mca)	Pressão Mín (mca)	$\Delta P_{\min}$ (mca)	$\Delta P_{\max}$ (mca)
16	Junção	-0,653	-5,830	-0,705	-7,366	0,187	-8,352	0,986	-0,892
15	Bomba	102,130	-10,007	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
14	Bomba	102,130	-10,007	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
13	Bomba	102,130	-10,007	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
12	Bomba	102,130	-10,007	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
1	Reservatório de Nível Fixo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
17	Válvula de Retenção	102,130	-10,007	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
21	Junção	102,130	-10,007	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
19	Válvula de Retenção	102,130	-10,007	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
18	Válvula de Retenção	102,130	-10,007	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
20	Válvula de Retenção	102,130	-10,007	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
2	Junção	95,405	-9,221	95,405	-8,613	95,405	-9,657	1,044	0,000
3	Junção	80,348	-10,007	80,333	-7,983	80,333	-10,007	2,024	0,000
4	TAEB/Ventosa	67,733	-10,007	67,645	0,914	67,629	-0,034	0,948	0,016
5	Junção	57,533	-10,007	57,033	-7,125	60,985	-8,191	1,066	-3,952
6	Junção	49,998	-8,494	49,611	-9,172	58,488	-9,094	-0,078	-8,877
22	Junção	32,923	29,362	34,348	29,346	34,157	29,338	0,008	0,191
7	Reservatório de Nível Fixo	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000	0,000	0,000

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Comparando-se a Simulação com TAEB – MOC Cavitação e a Simulação com Ventosa – MOC Cavitação, houve uma diferença média de 0,333 mca em termos de subpressão e de -0,751 mca em termos de sobrepressão. Assim, o TAEB foi mais efetivo que a Ventosa para os dois casos nessa adutora, apesar de a diferença entre as duas simulações ser menos de 1 mca. A Ventosa, por sua vez, aliviou as subpressões em 3,69% em comparação com a

simulação sem dispositivos. Assim, conclui-se que a maior vantagem na adoção do TAEB em relação à Ventosa foi o ganho de estabilidade na simulação.

Ademais, a maior diferença encontrada nas subpressões foi no nó 3, logo a montante do nó onde foram instalados o TAEB e a Ventosa, cujo resultado foi 2,024 mca. A maior diferença nas sobrepressões foi no nó 6, logo a jusante do nó do TAEB e da Ventosa, obtendo-se um resultado de -8,877 mca. Além disso, a simulação com a Ventosa trouxe um aumento de 7,13% nas sobrepressões quando comparada com a simulação sem dispositivos.

4.2.3. Comparação com Chaminé de Equilíbrio

A Chaminé de Equilíbrio testada para essa adutora foi posicionada no mesmo nó onde foram posicionados o TAEB e a Ventosa, cujos dados de entrada determinados pelo UFC 7 estão apresentados na Tabela 36.

Tabela 36 – Dados da Chaminé de Equilíbrio simulada na Adutora de Aurora/CE

Dados de entrada da Chaminé de Equilíbrio	
Diâmetro (m)	2,00
Nível Máximo de Água (m)	40,69
Coeficiente de Perda Localizada	3,10

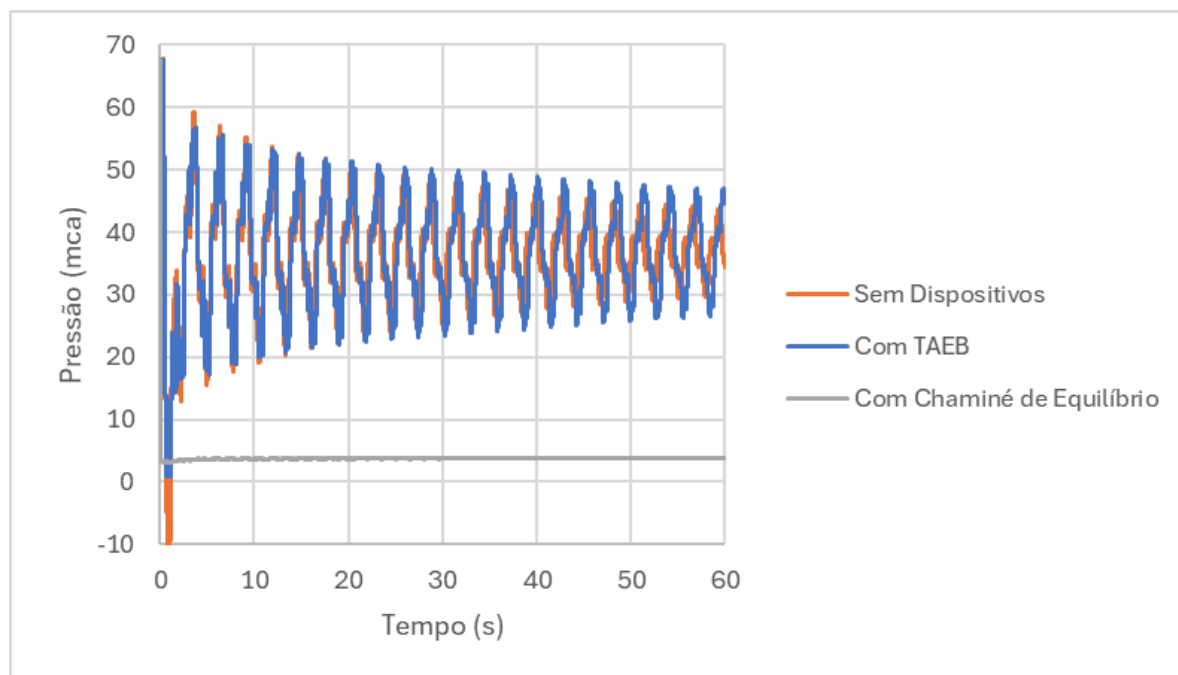
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Como o pré-dimensionamento realizado no UFC 7 resultou em uma Chaminé com altura bastante elevada, testaram-se alturas menores, de tal forma a obter uma Chaminé menos elevada e próxima à altura simulada com o TAEB para possibilitar uma comparação de atuação dos dois dispositivos com alturas semelhantes. Portanto, foram realizadas duas simulações: a primeira com a Chaminé com uma altura de 3,00 metros e a segunda com a altura de 40,69 metros sugerida pelo UFC 7.

4.2.3.1. Simulação com Chaminé de Equilíbrio com 3,00 metros de altura

A primeira simulação da Adutora de Aurora/CE com Chaminé de Equilíbrio foi realizada mantendo-se os dados da Tabela 36, porém alterando a altura para 3,00 m. Assim, a parada do conjunto motobomba promoveu os resultados de pressão apresentados na Figura 81, sendo possível realizar a comparação entre as simulações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio no nó onde os dispositivos foram posicionados.

Figura 81 – Comparação da pressão na seção do TAEB nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio de 3,00 metros de altura na Adutora de Aurora/CE

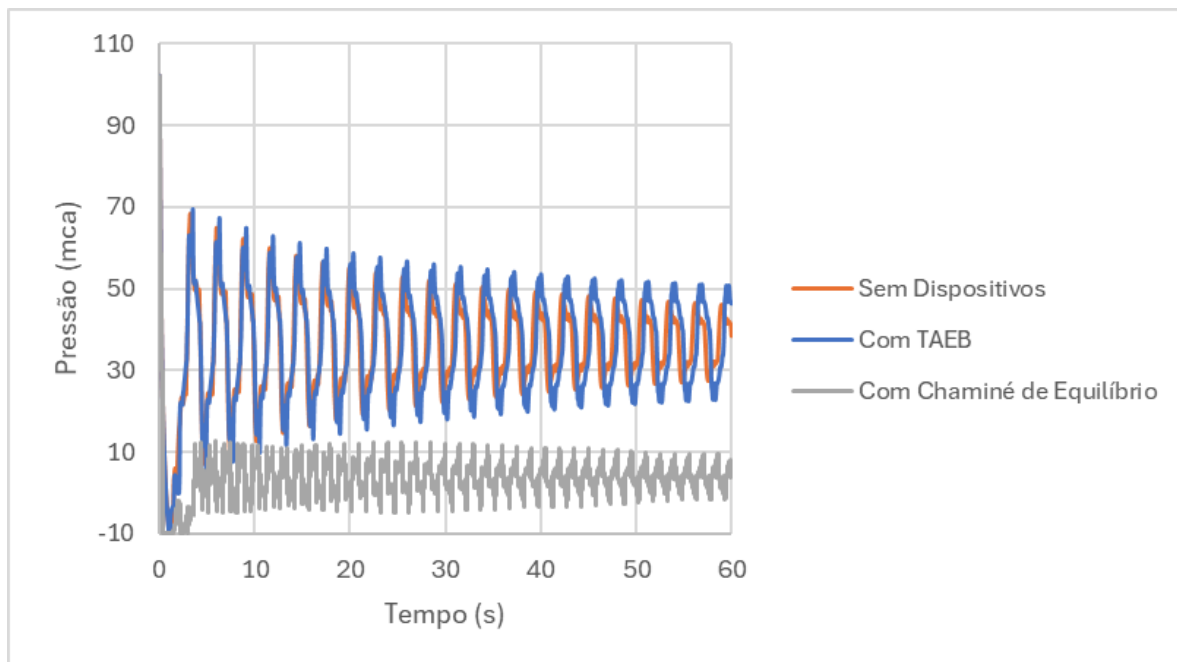


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Chaminé de Equilíbrio conseguiu manter a pressão em média do valor próximo do seu nível de água, ou seja, aproximadamente 3,00 mca. A pressão durante os 60 segundos de simulação foi em média 3,728 mca. Ela conseguiu eliminar os picos de sobrepressão e subpressão na seção onde foi instalada, enquanto que o TAEB apenas conseguiu limitar as pressões para o valor do rebaixamento máximo atingido em sua estrutura.

Na seção da válvula de retenção, foram obtidos os resultados de pressões apresentados na Figura 82, que traz a comparação entre as simulações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio.

Figura 82 – Comparação da pressão na seção da válvula de retenção nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio de 3,00 metros de altura na Adutora de Aurora/CE

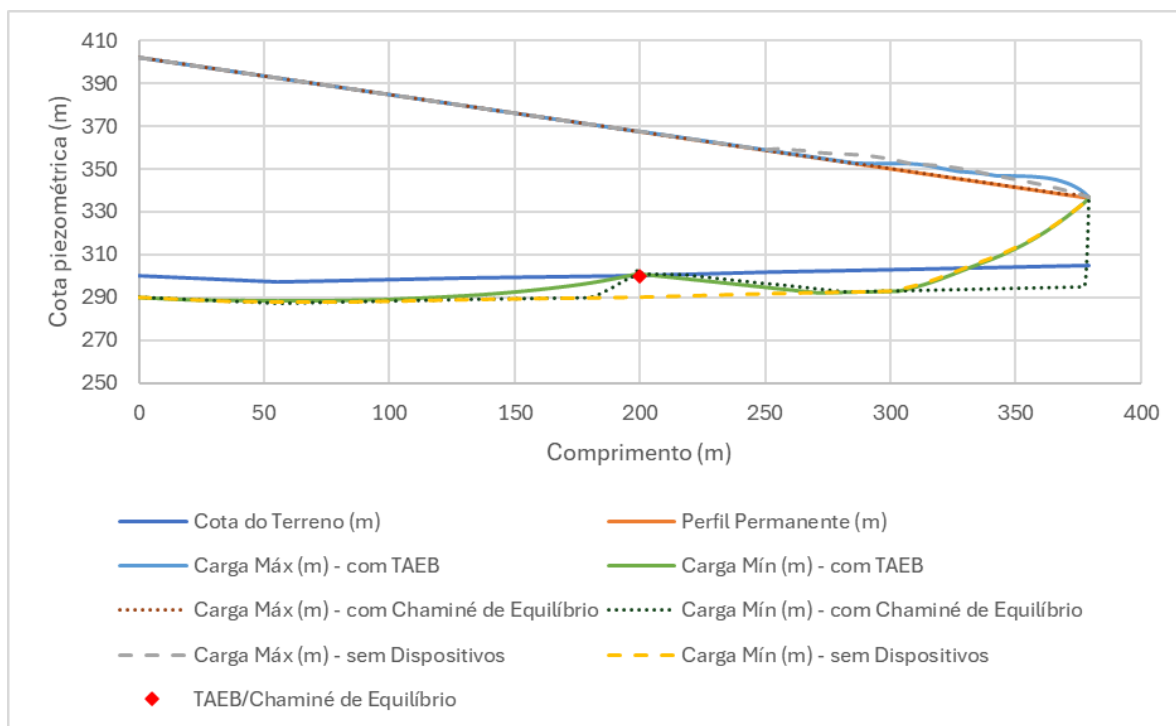


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Na seção da válvula de retenção, mesmo com a Chaminé de Equilíbrio, ainda se nota um comportamento de oscilação de pressões, porém com valores abaixo das outras duas situações. A pressão, após 5 segundos de simulação, oscila aproximadamente em torno do valor da altura do nível máximo de água na Chaminé, ou seja, 3,00 mca. Considerando todo o tempo simulado, a pressão média obtida pela simulação com a Chaminé foi de 3,516 mca.

De tal forma a comparar as envoltórias das três simulações, elaborou-se a Figura 83.

Figura 83 – Comparação das envoltórias máximas e mínimas nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio de 3,00 metros de altura na Adutora de Aurora/CE



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A partir da visualização das envoltórias, é possível notar que, apesar de a Chaminé de Equilíbrio ter promovido menores valores de pressão do que o TAEB, nas seções a jusante dos dispositivos, nota-se que o TAEB teve um desempenho melhor, pois a simulação com a Chaminé trouxe subpressões menores até mesmo comparando-se com a situação sem dispositivos. Em relação às sobrepressões, a Chaminé teve um melhor desempenho, pois conseguiu igualar a pressão com o perfil permanente em todos os pontos da adutora. Em comparação com o TAEB, porém, houve pouca diferença na atuação, uma vez que do início da adutora até aproximadamente 300 metros da sua extensão, o TAEB também conseguiu igualar a pressão com o perfil permanente.

Quantitativamente, é possível comparar os resultados das simulações a partir da análise da Tabela 37.

Tabela 37 – Pressões máximas e mínimas da Adutora de Aurora/CE – Comparação com Chaminé de Equilíbrio com altura de 3,00 metros

Nós	Contorno	Simulação sem Dispositivos – MOC Cavitação		Simulação com TAEB – MOC Cavitação		Simulação com Chaminé de Equilíbrio – MOC Cavitação		Comparação – TAEB e Chaminé de Equilíbrio	
		Pressão Máx (mca)	Pressão Mín (mca)	Pressão Máx (mca)	Pressão Mín (mca)	Pressão Máx (mca)	Pressão Mín (mca)	$\Delta P_{\min}$ (mca)	$\Delta P_{\max}$ (mca)
16	Junção	-0,653	-5,830	-0,705	-7,366	11,721	-10,007	2,641	-12,426
15	Bomba	102,130	-10,007	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
14	Bomba	102,130	-10,007	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
13	Bomba	102,130	-10,007	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
12	Bomba	102,130	-10,007	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
1	Reservatório de Nível Fixo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
17	Válvula de Retenção	102,130	-10,007	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
21	Junção	102,130	-10,007	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
19	Válvula de Retenção	102,130	-10,007	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
18	Válvula de Retenção	102,130	-10,007	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
20	Válvula de Retenção	102,130	-10,007	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
2	Junção	95,405	-9,221	95,405	-8,613	95,405	-10,007	1,394	0,000
3	Junção	80,348	-10,007	80,333	-7,983	80,333	-10,007	2,024	0,000
4	TAEB/ Chaminé de Equilíbrio	67,733	-10,007	67,645	0,914	67,590	3,040	-2,126	0,055
5	Junção	57,533	-10,007	57,033	-7,125	56,858	-5,482	-1,643	0,175
6	Junção	49,998	-8,494	49,611	-9,172	46,200	-10,007	0,835	3,411
22	Junção	32,923	29,362	34,348	29,346	33,552	-10,007	39,353	0,796
7	Reservatório de Nível Fixo	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000	0,000	0,000

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Comparando-se a Simulação com TAEB – MOC Cavitação e a Simulação com Chaminé de Equilíbrio – MOC Cavitação, houve uma diferença média de 2,360 mca em termos de subpressão e de -0,444 mca em termos de sobrepressão. Assim, o TAEB foi mais efetivo que a Chaminé no combate às subpressões e menos efetivo no combate às sobrepressões. A

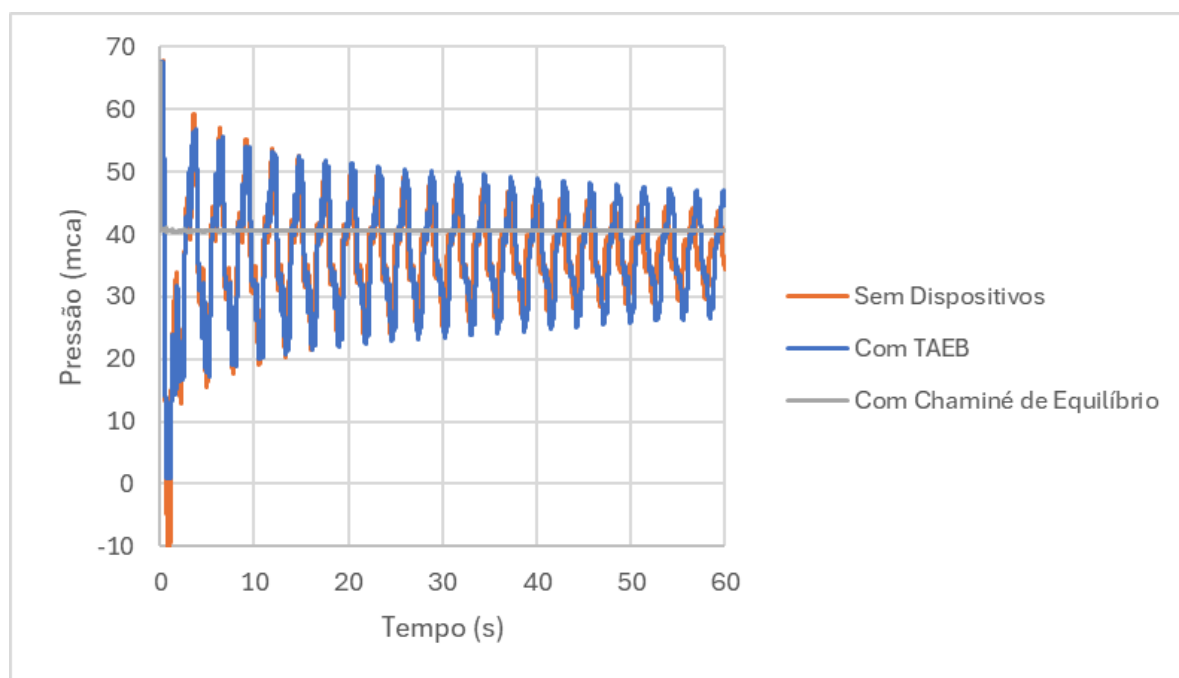
Chaminé promoveu um aumento nas subpressões de 3,32% quando comparada com a simulação sem dispositivos.

Ademais, a maior diferença encontrada nas subpressões foi no nó 22, que corresponde ao trecho imediatamente antes do reservatório de jusante, cujo resultado foi 39,353 mca. A maior diferença nas sobrepressões foi no nó 16, logo a montante do conjunto motobomba, obtendo-se um resultado de -12,426 mca. Além disso, a sobrepressão sofreu uma redução percentual de 0,44% quando comparada com a simulação sem dispositivos.

4.2.3.2. Simulação com Chaminé de Equilíbrio com 40,69 metros de altura

Prosseguindo-se com os testes realizados, a segunda Chaminé de Equilíbrio simulada para essa adutora foi aquela obtida pelo pré-dimensionamento do UFC 7, ou seja, considerando uma altura de 40,69 metros. A parada do conjunto motobomba gerou os resultados de pressão na seção dos dispositivos apresentados na Figura 84, que permite realizar a comparação entre as simulações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio.

Figura 84 – Comparação da pressão na seção do TAEB nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio de 40,69 metros de altura na Adutora de Aurora/CE

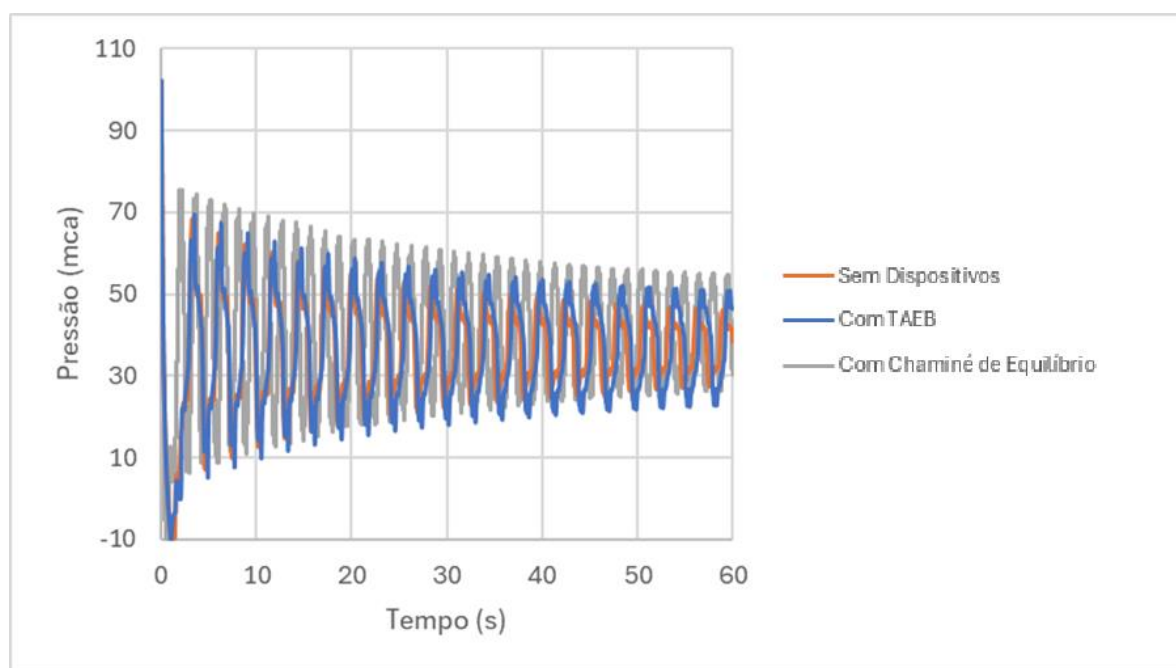


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Chaminé manteve o mesmo comportamento das outras simulações. Para esse caso, observa-se que o valor de pressão que ela sustenta se aproxima bastante do valor médio considerando os picos de pressão nas situações sem dispositivos e com TAEB. Ademais, a Chaminé manteve a pressão aproximadamente igual à altura da coluna de água no dispositivo, impossibilitando a ocorrência de picos de pressão ao longo do tempo. A pressão média obtida pela Chaminé ao longo do tempo de simulação foi de 40,569 mca, bem próximo do valor da altura máxima de 40,69 metros.

Já na seção da válvula de retenção, foi gerada a Figura 85, que traz a comparação entre as simulações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio.

Figura 85 – Comparação da pressão na seção da válvula de retenção nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio de 40,69 metros de altura na Adutora de Aurora/CE

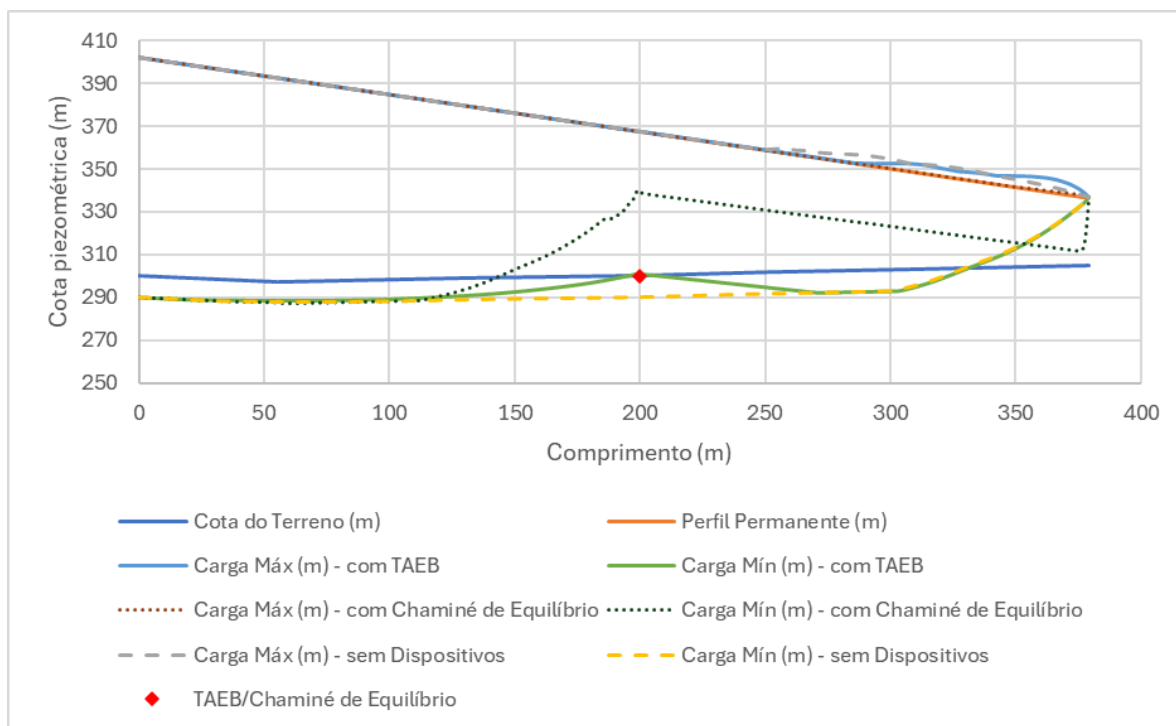


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Nota-se que, apesar de a Chaminé ter sido efetiva no combate às pressões na seção onde foi instalada, a montante do nó ela piorou os picos de sobrepressão, enquanto que o TAEB teve um efeito melhor. A Chaminé foi mais efetiva que o TAEB no combate às subpressões nesse nó. Em média, a pressão nesse nó ao longo da simulação foi de 40,107 mca.

No tocante às envoltórias, foi elaborada a Figura 86, que permite comparar as três simulações realizadas.

Figura 86 – Comparação das envoltórias máximas e mínimas nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio de 40,69 metros de altura na Adutora de Aurora/CE



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Pela visualização das envoltórias, nota-se que a Chaminé com a altura de 40,69 metros conseguiu elevar a subpressão até o seu nível máximo de água e isso se refletiu nos demais pontos da adutora. Do início da adutora até aproximadamente 350 metros de extensão, a Chaminé apresentou melhores resultados que o TAEB, porém, a partir desse ponto, a envoltória sofre uma queda que a torna pior do que o resultado obtido pelo TAEB. Em relação às sobrepressões, a Chaminé conseguiu novamente igualar a envoltória de máximas com o perfil permanente, da mesma forma que aconteceu com a Chaminé de 3,00 metros de altura. No entanto, ressalta-se que o TAEB apresentou um comportamento semelhante do início até 300 metros de extensão da adutora.

Por fim, a Tabela 38 apresenta a comparação entre as pressões máximas e mínimas obtidas em todos os nós da Adutora de Aurora/CE com os dois dispositivos.

Tabela 38 – Pressões máximas e mínimas da Adutora de Aurora/CE – Comparação com Chaminé de Equilíbrio com altura de 40,69 metros

Nós	Contorno	Simulação sem Dispositivos – MOC Cavitação		Simulação com TAEB – MOC Cavitação		Simulação com Chaminé de Equilíbrio – MOC Cavitação		Comparação – TAEB e Chaminé de Equilíbrio	
		Pressão Máx (mca)	Pressão Mín (mca)	Pressão Máx (mca)	Pressão Mín (mca)	Pressão Máx (mca)	Pressão Mín (mca)	$\Delta P_{\min}$ (mca)	$\Delta P_{\max}$ (mca)
16	Junção	-0,653	-5,830	-0,705	-7,366	2,632	-9,843	2,477	-3,337
15	Bomba	102,130	-10,007	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
14	Bomba	102,130	-10,007	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
13	Bomba	102,130	-10,007	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
12	Bomba	102,130	-10,007	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
1	Reservatório de Nível Fixo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
17	Válvula de Retenção	102,130	-10,007	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
21	Junção	102,130	-10,007	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
19	Válvula de Retenção	102,130	-10,007	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
18	Válvula de Retenção	102,130	-10,007	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
20	Válvula de Retenção	102,130	-10,007	102,130	-10,007	102,130	-10,007	0,000	0,000
2	Junção	95,405	-9,221	95,405	-8,613	95,405	-9,610	0,997	0,000
3	Junção	80,348	-10,007	80,333	-7,983	80,333	-4,533	-3,450	0,000
4	TAEB/ Chaminé de Equilíbrio	67,733	-10,007	67,645	0,914	67,590	40,305	-39,391	0,055
5	Junção	57,533	-10,007	57,033	-7,125	56,858	29,063	-36,188	0,175
6	Junção	49,998	-8,494	49,611	-9,172	46,200	19,328	-28,500	3,411
22	Junção	32,923	29,362	34,348	29,346	33,281	9,092	20,254	1,067
7	Reservatório de Nível Fixo	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000	0,000	0,000

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Comparando-se a Simulação com TAEB – MOC Cavitação e a Simulação com Chaminé de Equilíbrio – MOC Cavitação, houve uma diferença média de -4,656 mca em termos de subpressão e de 0,076 mca em termos de sobrepressão considerando todos os nós da adutora. Em termos percentuais, houve um alívio de subpressão promovido pelo Chaminé de 66,67%

em comparação com a simulação sem dispositivos e de 0,49% nas sobrepressões. Assim, a Chaminé foi mais efetiva que o TAEB na atenuação às sobrepressões e subpressões.

Ademais, a maior diferença encontrada nas subpressões foi no nó 4, que corresponde ao nó onde os dispositivos foram instalados. Nesse nó e nas proximidades, a Chaminé foi mais efetiva que o TAEB. A diferença encontrada foi de -39,391 mca. Já para as sobrepressões, a maior diferença encontrada entre as duas simulações foi no nó 6, a jusante dos dispositivos, cujo valor foi de 3,411 mca.

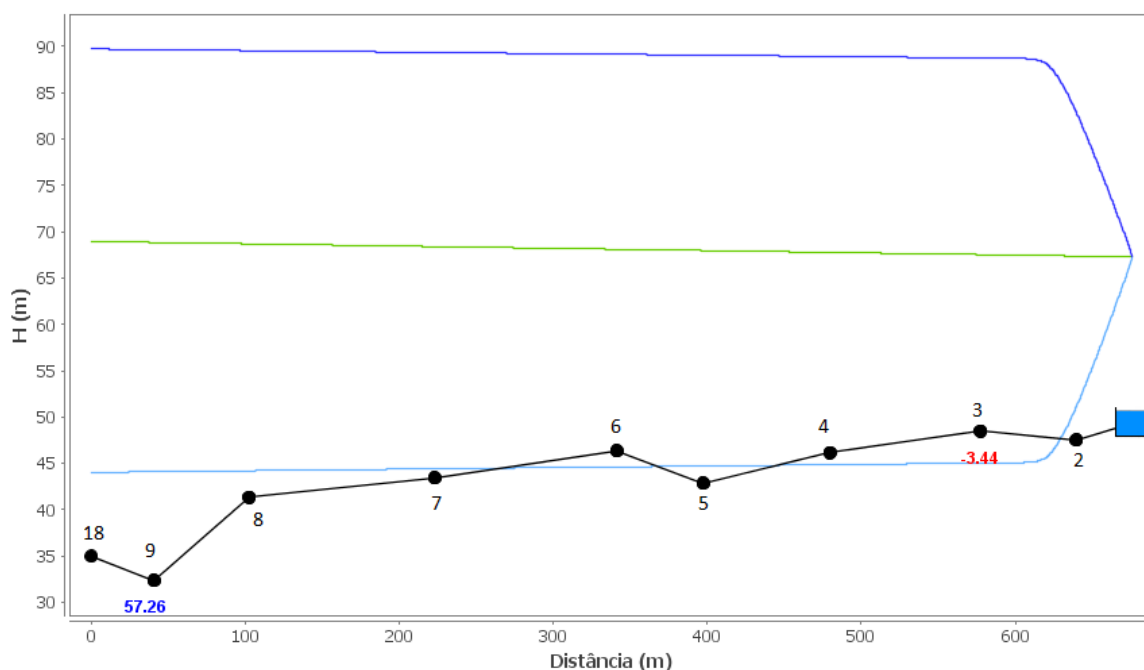
Comparando as simulações realizadas para as duas Chaminés de Equilíbrio (a primeira com altura de 3,00 metros e a segunda com altura de 40,69 metros), ressalta-se que ela é um dispositivo altamente confiável no combate às sobrepressões e subpressões, especialmente a jusante de onde é instalada. No entanto, também se observa que o TAEB consegue ser bastante efetivo e teve um resultado tão bom ou até melhor que a Chaminé em alguns pontos da adutora, porém com uma altura de apenas 1,00 metro, o que é bastante interessante para a economia de recursos na implantação do sistema hidráulico. Destaca-se que, para que a Chaminé fosse mais efetiva que o TAEB, foi necessário adotar a altura de 40,69 metros, o que aumenta substancialmente os custos de instalação e manutenção.

4.3. Adutora de Alcântara/MA

4.3.1. Comparação com Situação sem Dispositivos de Proteção

A simulação sem nenhum dispositivo de alívio possibilitou o posicionamento do TAEB no nó de menor subpressão, conforme visualizado na Figura 87.

Figura 87 – Simulação da Adutora de Alcântara/MA com o MOC no UFC 7 sem dispositivos de proteção



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

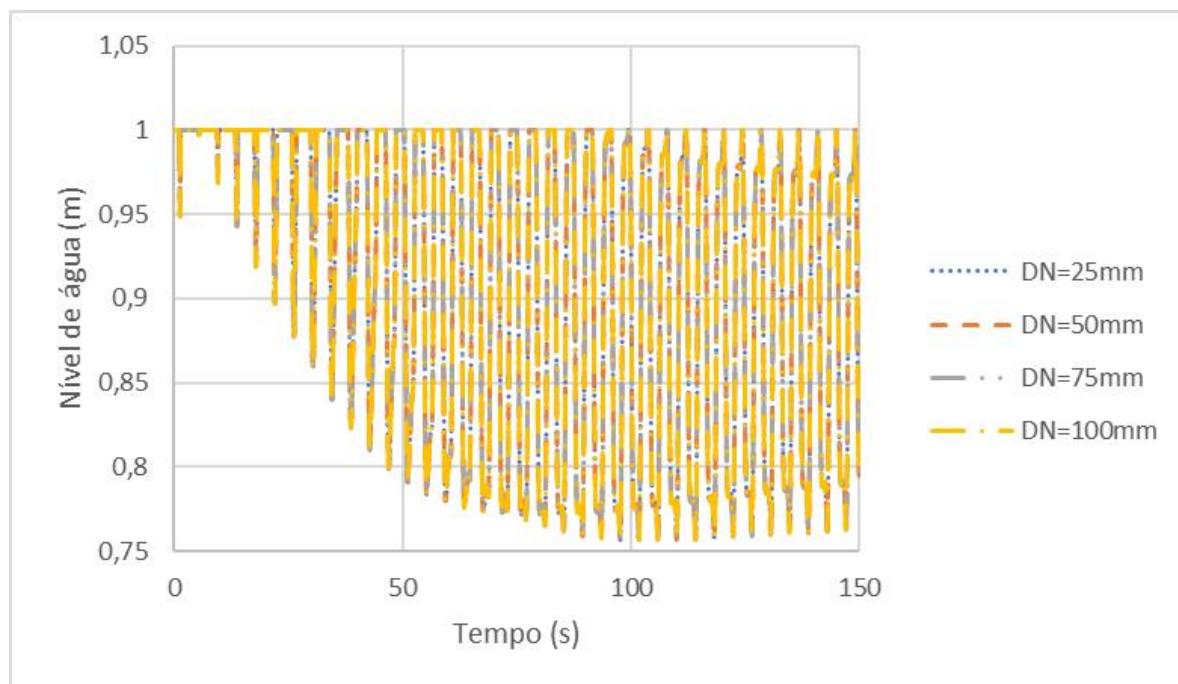
Assim, o TAEB foi posicionado no nó 3, cujo resultado de pressão mínima foi de -3,44 mca.

Para essa adutora, foram realizadas diversas simulações, uma vez que o comportamento do TAEB se mostrou diferente em relação às duas situações anteriores. Os próximos tópicos ilustram os resultados obtidos.

4.3.1.1. Simulação com diâmetro do TAEB de 150 mm

Conforme sugerido no item 3.6.6 deste trabalho, primeiramente foi adotado o diâmetro do TAEB igual ao da adutora, ou seja, 150 mm. O comprimento do TAEB adotado foi de 1,00 m nessa simulação e o Coeficiente de Perda Localizada foi adotado como 5,50. Para o diâmetro considerado, foram realizadas simulações variando-se o diâmetro da Ventosa instalada, resultando na Figura 88.

Figura 88 – Nível de água no TAEB (diâmetro de 150 mm) para cada diâmetro de Ventosa simulado ao longo do tempo de simulação no UFC 7 na Adutora de Alcântara/MA



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Nota-se que há um comportamento diferente da variação do nível da água na estrutura do TAEB para essa adutora, independentemente do diâmetro de Ventosa adotado na simulação. Diferentemente do segundo caso simulado neste trabalho, para essa adutora, ocorrem oscilações durante a simulação do transiente, chegando a um valor máximo de rebaixamento de aproximadamente 24 cm. Comparativamente com a Adutora de Aurora/CE, a Adutora de Alcântara/MA apresenta o diâmetro de suas tubulações 3 vezes maior, o que infere em uma área 9 vezes maior. Além disso, o seu comprimento é aproximadamente 2 vezes maior que a Adutora de Aurora/CE. Essas variáveis, combinadamente, influenciam no volume de água presente na Adutora de Alcântara/MA, que é consideravelmente maior que na Adutora de Aurora/CE. Foi elaborada a Tabela 39 de tal forma a permitir uma comparação geométrica entre as duas adutoras, complementando esta análise.

Tabela 39 – Comparação entre os dados das Adutoras de Aurora/CE e Alcântara/MA

Adutora	Comprimento total (m)	Diâmetro das tubulações (mm)	Área da seção transversal das tubulações (m ²)	Volume total de água (m ³)
Aurora/CE	379,04	50	0,0019	0,744
Alcântara/MA	676,04	150	0,0170	11,945

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O comportamento oscilatório persistente do nível de água no TAEB na Adutora de Alcântara/MA justifica-se pela elevada inércia da coluna líquida, que é significativamente superior à da Adutora de Aurora/CE. O volume de água presente na Adutora de Alcântara/MA é aproximadamente 16 vezes maior que na Adutora de Aurora/CE. Assim, o sistema da Adutora de Alcântara/MA armazena uma energia cinética maior que precisa ser dissipada através do atrito e da variação de fluxo no dispositivo. Devido ao maior comprimento da adutora, o período de reflexão das ondas é mais longo, retardando a estabilização do sistema.

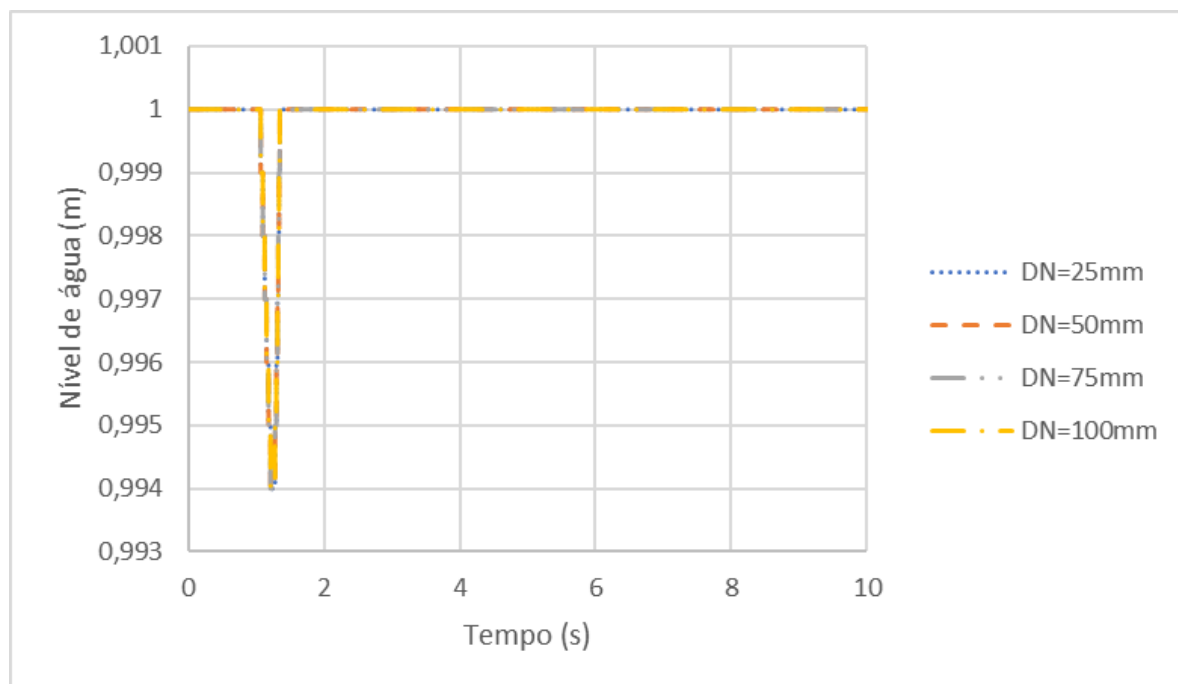
Ademais, a dinâmica é influenciada pela compressibilidade do ar admitido no TAEB. Durante a fase de pressão positiva, a coluna de água em ascensão comprime o volume de ar aprisionado, cuja expulsão é limitada pela capacidade da Ventosa. O ar aprisionado atua devolvendo energia ao sistema e empurrando a água de volta para a adutora. Dado o grande volume de água envolvido, essa alternância de energia entre o ar aprisionado e a coluna líquida sustenta as oscilações por um período prolongado, diferentemente do que ocorre na Adutora de Aurora/CE, em que a baixa massa de água e o rápido amortecimento estabilizam o nível quase instantaneamente.

Assim, durante as simulações realizadas, foi observado que a variável que apresenta a maior influência sobre as oscilações no TAEB é o seu diâmetro. De forma a neutralizar esse efeito, foram realizados testes até obter um diâmetro que eliminasse as oscilações observadas para 150 mm. O diâmetro que ocasionou esse resultado foi o de 400 mm.

4.3.1.2. Simulação com diâmetro do TAEB de 400 mm

Para o diâmetro do TAEB de 400 mm, também foi adotado o comprimento da estrutura do TAEB de 1,00 m e Coeficiente de Perda Localizada de 5,50. Com esses dados de entrada e variando-se o diâmetro da Ventosa, foi obtido o resultado ilustrado na Figura 89.

Figura 89 – Nível de água no TAEB (diâmetro de 400 mm) para cada diâmetro de Ventosa simulado ao longo do tempo de simulação no UFC 7 na Adutora de Alcântara/MA



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Com essa nova configuração, ocorre o mesmo efeito de amortecimento nas envoltórias de pressão. Porém, o aumento do diâmetro do TAEB promove uma redução na velocidade que entra e sai da sua estrutura, para a mesma vazão da situação anterior, o que também reduz a energia cinética no dispositivo, eliminando as oscilações observadas para o diâmetro de 150 mm e possibilitando a estabilização do nível de água na altura total disponível de 1,00 m. Além disso, para essa nova situação, o nível rebaixa apenas 0,6 cm. Por fim, observa-se que a Ventosa a ser escolhida é a de 25 mm, por ser mais economicamente acessível, uma vez que não houve diferença nos resultados obtidos para Ventosas com maiores diâmetros.

Adotando-se essas variáveis para o TAEB, foram gerados os demais resultados para a Adutora de Alcântara/MA. Os dados da Ventosa adotada estão na Tabela 40.

Tabela 40 – Dados da Ventosa do TAEB simulado na Adutora de Alcântara/MA

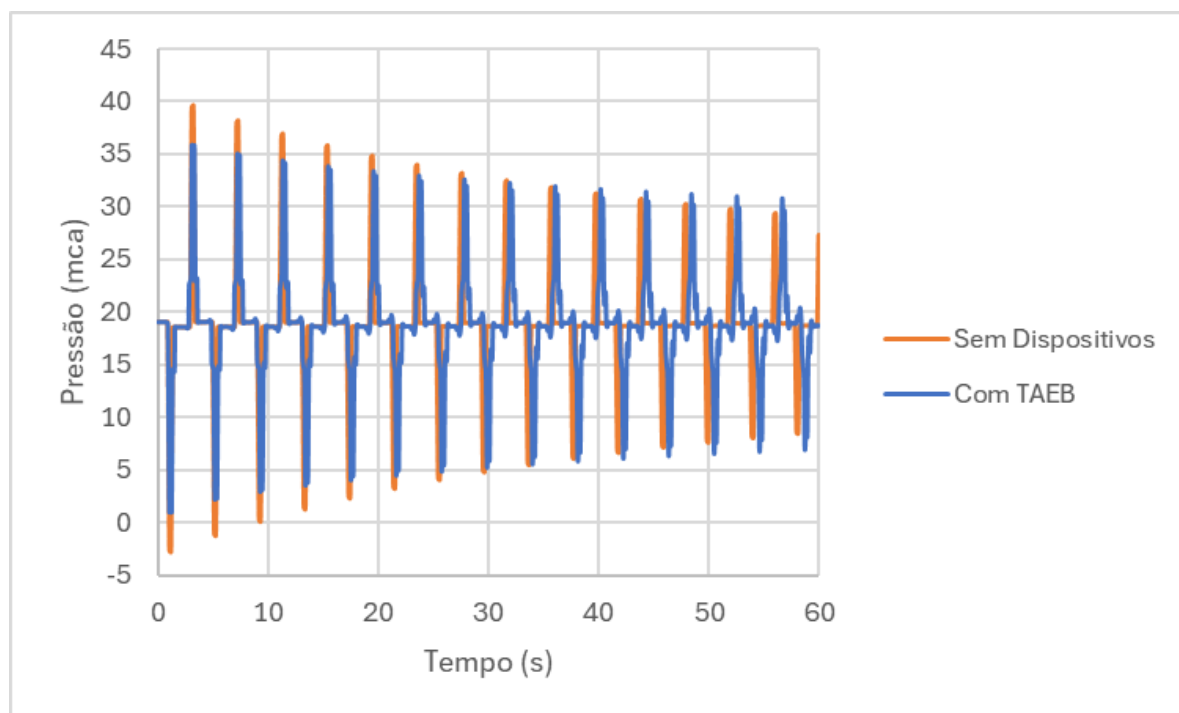
Dados de entrada da Ventosa do TAEB	
Diâmetro da Ventosa (mm)	25
Área do Orifício Cinético (mm ²)	506,70
Coeficiente de Admissão de Ar	0,590
Coeficiente de Expulsão de Ar	0,990
Temperatura Interna (°C)	25,00

Temperatura Externa (°C)	24,00
--------------------------	-------

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A parada do conjunto motobomba dessa adutora gerou os resultados de pressão apresentados na Figura 90 na seção do TAEB, comparando-se as simulações sem Dispositivos e com TAEB.

Figura 90 – Comparação da pressão na seção do TAEB nas situações sem Dispositivos e com TAEB na Adutora de Alcântara/MA



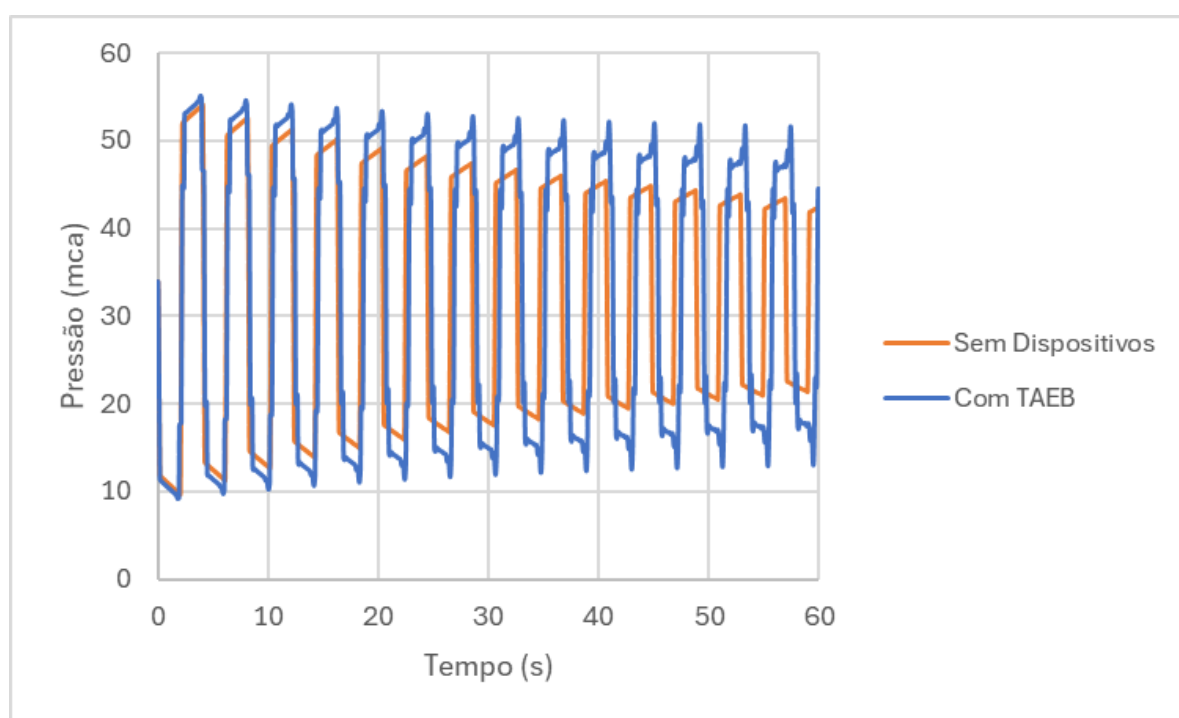
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Nessa adutora, percebe-se a influência do TAEB tanto na subpressão como na sobrepressão. Como em todos os casos analisados anteriormente, o TAEB limitou a subpressão para o valor referente à altura do nível mínimo de água obtido na simulação, ou seja, aproximadamente 0,994 m. Além disso, ocorre uma redução ao longo do tempo nos picos de subpressão e sobrepressão, até 30 segundos, quando os resultados de subpressão e sobrepressão com o TAEB se tornam, respectivamente, menores e maiores que os resultados sem o dispositivo, porém com uma diferença de aproximadamente 1,20 mca. O instante que o TAEB começa a atuar corresponde ao tempo do rebaixamento do nível de água observado na Figura 89.

Comparativamente, a maior sobrepressão atingida na simulação sem o TAEB foi de 39,643 mca, no instante em que a simulação alcança 3 segundos. Nesse mesmo instante, a simulação com o TAEB atingiu um valor de 35,883 mca, representando um alívio de 3,760 mca.

Comparando-se as pressões obtidas pelas simulações sem Dispositivos e com TAEB na seção da válvula de retenção desta adutora, foi elaborada a Figura 91.

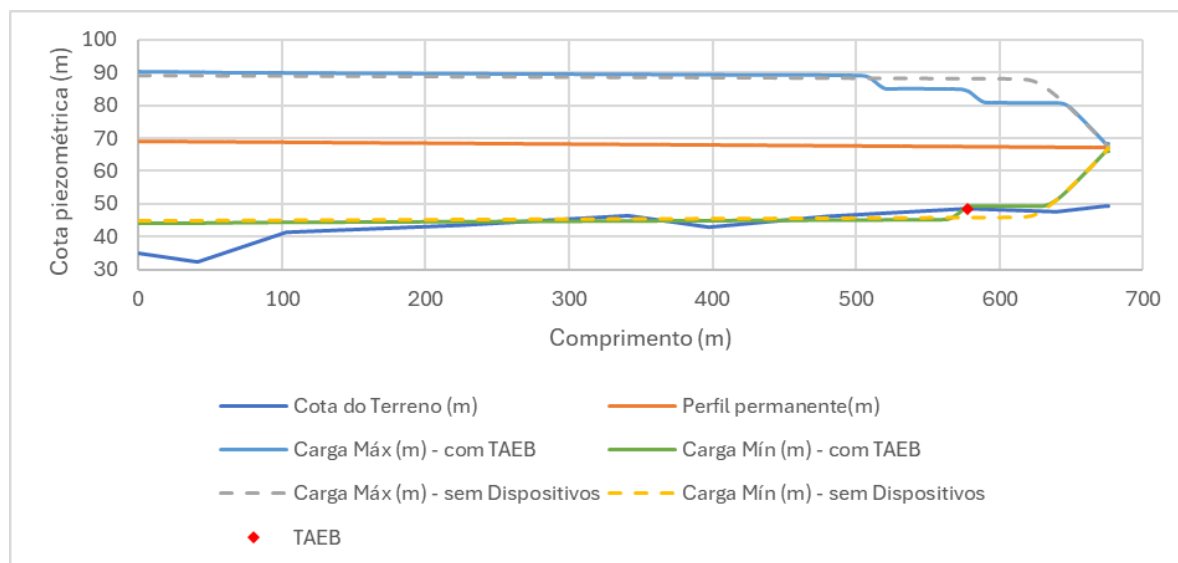
Figura 91 – Comparação da pressão na seção da válvula de retenção nas situações sem Dispositivos e com TAEB na Adutora de Alcântara/MA



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O efeito do TAEB na seção da válvula de retenção trouxe picos maiores de sobrepressão e subpressão para essa adutora. Nesse sentido, o seu efeito piorou os resultados nessa seção. Além disso, comparando-se todas sobrepressões e subpressões das duas simulações, obteve-se uma diferença média de 0,20 mca, sendo que a simulação com o TAEB trouxe maiores resultados. Entretanto, de maneira geral, o TAEB foi efetivo nos demais pontos da adutora, como pode ser observado nas envoltórias da Figura 92, que traz a comparação de envoltórias entre as duas simulações realizadas.

Figura 92 – Comparação das envoltórias máximas e mínimas nas situações sem Dispositivos e com TAEB na Adutora de Alcântara/MA



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Pelo resultado das envoltórias, percebe-se que o TAEB teve influência nas duas envoltórias (subpressão e sobrepressão) a jusante de onde está instalado, enquanto que a montante, as envoltórias praticamente coincidiram. Pelo fato de as envoltórias demonstrarem os maiores picos de pressão encontrados durante toda a simulação, os maiores valores de sobrepressões e subpressões no nó da válvula de retenção, comparando-se a simulação sem e com o TAEB, tiveram pouca diferença entre si. Isso justifica o motivo de as envoltórias de pressão na válvula de retenção praticamente coincidirem. Ademais, o TAEB cumpriu efetivamente a sua função de elevar a subpressão para uma altura acima do terreno acrescido do rebaixamento máximo do dispositivo. Nota-se que, na situação sem o dispositivo, a cota piezométrica nessa região está abaixo do terreno, gerando pressões negativas, que são combatidas com a adição do TAEB no nó de menor subpressão. Esse efeito também foi sentido na sobrepressão logo após a reflexão da onda de pressão pelo reservatório de jusante. Até aproximadamente 510,00 m do comprimento da adutora, a sobrepressão é menor do que na situação sem o TAEB e, antes disso, as duas envoltórias coincidem.

A Tabela 41 apresenta os resultados de pressões máximas e mínimas obtidas nas simulações para todos os nós dessa adutora.

Tabela 41 – Pressões máximas e mínimas da Adutora de Alcântara/MA

Nós	Contorno	Simulação sem Dispositivos – MOC		Simulação sem dispositivos – MOC Cavitação		Simulação com TAEB – MOC Cavitação		Comparação – Sem dispositivos e TAEB	
		Pressão Máx (mca)	Pressão Mín (mca)	Pressão Máx (mca)	Pressão Mín (mca)	Pressão Máx (mca)	Pressão Mín (mca)	$\Delta P_{\min}$ (mca)	$\Delta P_{\max}$ (mca)
15	Junção	-2,727	-6,251	-2,658	-6,280	-2,732	-6,148	-0,132	0,074
14	Bomba	33,950	9,030	33,950	9,666	33,950	9,195	0,471	0,000
13	Bomba	33,950	9,030	33,950	9,666	33,950	9,195	0,471	0,000
10	Reservatório de Nível Fixo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
16	Válvula de Retenção	54,731	9,034	54,105	9,669	55,117	9,195	0,474	-1,012
18	Junção	54,721	9,035	54,100	9,670	55,117	9,195	0,475	-1,017
17	Válvula de Retenção	54,731	9,034	54,105	9,669	55,117	9,195	0,474	-1,012
9	Junção	57,258	11,713	56,636	12,348	57,570	11,870	0,478	-0,934
8	Junção	48,207	2,876	47,583	3,512	48,400	3,161	0,351	-0,817
7	Junção	45,902	0,983	45,278	1,621	46,059	1,273	0,348	-0,781
6	Junção	42,793	-1,740	42,167	-1,101	42,942	-1,443	0,342	-0,775
5	Junção	46,162	1,824	45,535	2,464	46,303	2,123	0,341	-0,768
4	Junção	42,760	-1,289	42,133	-0,649	42,917	-0,988	0,339	-0,784
3	TAEB	40,271	-3,438	39,643	-2,796	35,884	0,994	-3,790	3,759
2	Junção	35,325	3,599	35,349	3,566	33,154	3,781	-0,215	2,195
19	Junção	19,161	16,823	19,158	16,837	19,164	16,862	-0,025	-0,006
1	Reservatório de Nível Fixo	18,020	18,020	18,020	18,020	18,020	18,020	0,000	0,000

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Em termos de subpressões, houve uma diferença média de 0,024 mca entre a Simulação sem dispositivos – MOC Cavitação e a Simulação com TAEB – MOC Cavitação. A maior diferença observada foi na seção do TAEB, que promoveu um alívio de -3,79 mca, correspondente à diferença entre -2,796 mca e 0,994 mca, e este último valor corresponde ao nível mínimo de água obtido no TAEB durante toda a simulação. Relativamente, o TAEB, considerando todos nós da adutora, promoveu subpressões menores que na simulação sem dispositivos, sendo essa diferença encontrada de 0,82%.

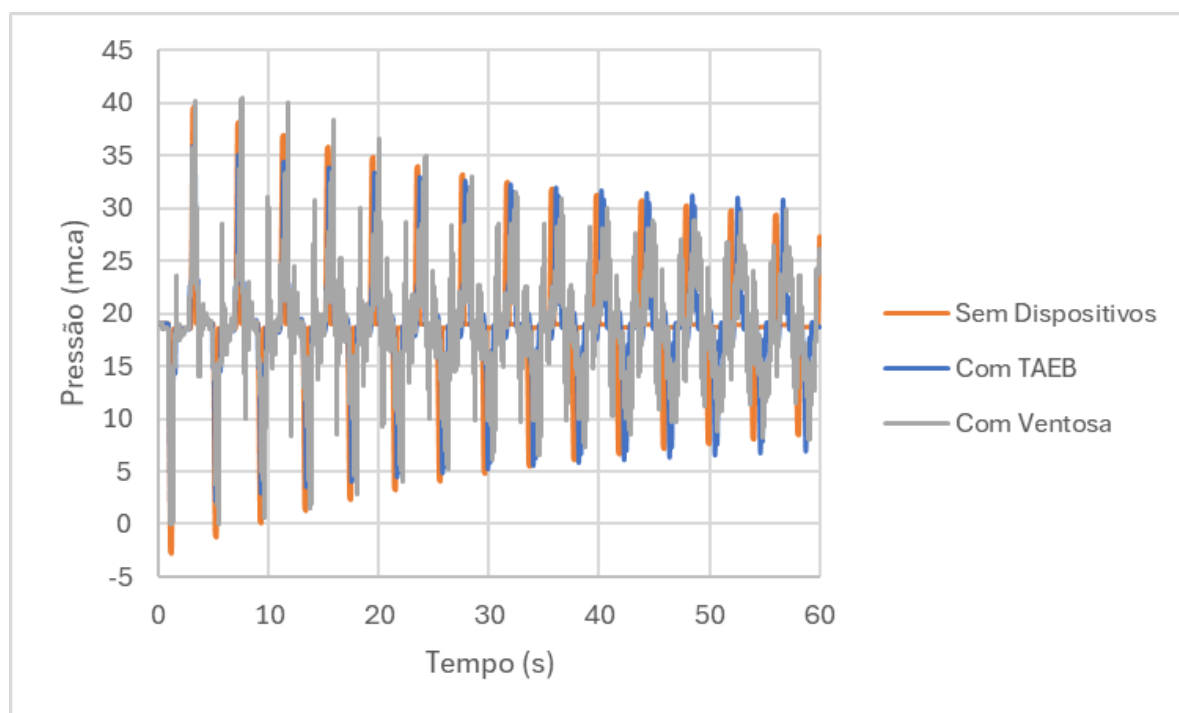
Já para as sobrepressões, a diferença média observada entre as duas simulações foi de -0,110 mca. As maiores diferenças encontradas nas sobrepressões foram de 3,759 mca e 2,195 mca nos nós 3 e 2, respectivamente, o nó onde o TAEB foi instalado e o nó logo a jusante

dele. O TAEB promoveu um aumento percentual de 0,15%, em média, considerando todos os nós da adutora e comparando com a simulação sem dispositivos.

4.3.2. Comparação com Ventosa

Adotando-se os dados da Ventosa da Tabela 40 no mesmo nó onde foi inserido o TAEB, foram gerados os resultados apresentados na Figura 93, que ilustra a comparação entre as pressões obtidas nas simulações sem Dispositivos, com TAEB e com Ventosa na seção onde os dispositivos foram instalados.

Figura 93 – Comparação da pressão na seção do TAEB nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Ventosa na Adutora de Alcântara/MA



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

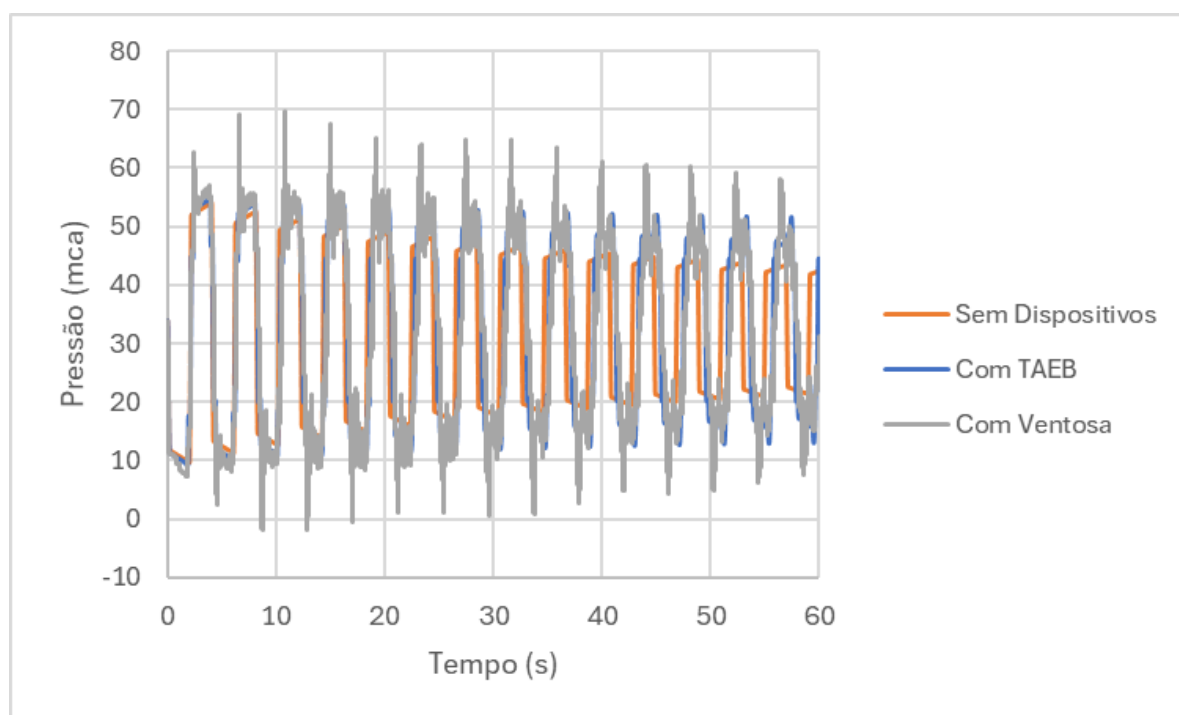
De maneira semelhante à Adutora de Aurora/CE, a principal diferença entre as simulações considerando os dois dispositivos foi o ganho de estabilidade: a simulação com o TAEB permitiu a obtenção de picos de pressão mais estáveis, enquanto que a Ventosa promoveu picos que oscilam bastante durante o tempo de simulação. Em termos de valores, foram observados picos maiores na simulação com a Ventosa, o que também configura uma vantagem do TAEB em relação à Ventosa para essa adutora. Em termos de sobrepressões, o

TAEB obteve picos, em média, 0,863 mca menores que a Ventosa; já para as subpressões, essa diferença foi de -0,408 mca.

Observa-se uma grande instabilidade na simulação com a Ventosa em relação ao TAEB, muito possivelmente devido à falta de controle de entrada e saída de ar na Ventosa. Cabe destacar, ainda, que a menor vazão obtida na simulação com a Ventosa foi de $-0,014 \text{ m}^3/\text{s}$, quando a simulação atingiu 6 segundos; nesse instante, a simulação com o TAEB obteve um resultado de $-0,011 \text{ m}^3/\text{s}$. A maior vazão obtida na simulação com a Ventosa foi de $0,014 \text{ m}^3/\text{s}$ aos 8 segundos de simulação, sendo que com o TAEB, nesse instante, a vazão foi de $0,011 \text{ m}^3/\text{s}$.

Na seção da válvula de retenção, observaram-se os resultados de pressão presentes na Figura 94, sendo possível realizar a comparação entre as simulações sem Dispositivos, com TAEB e com Ventosa.

Figura 94 – Comparação da pressão na seção da válvula de retenção nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Ventosa na Adutora de Alcântara/MA



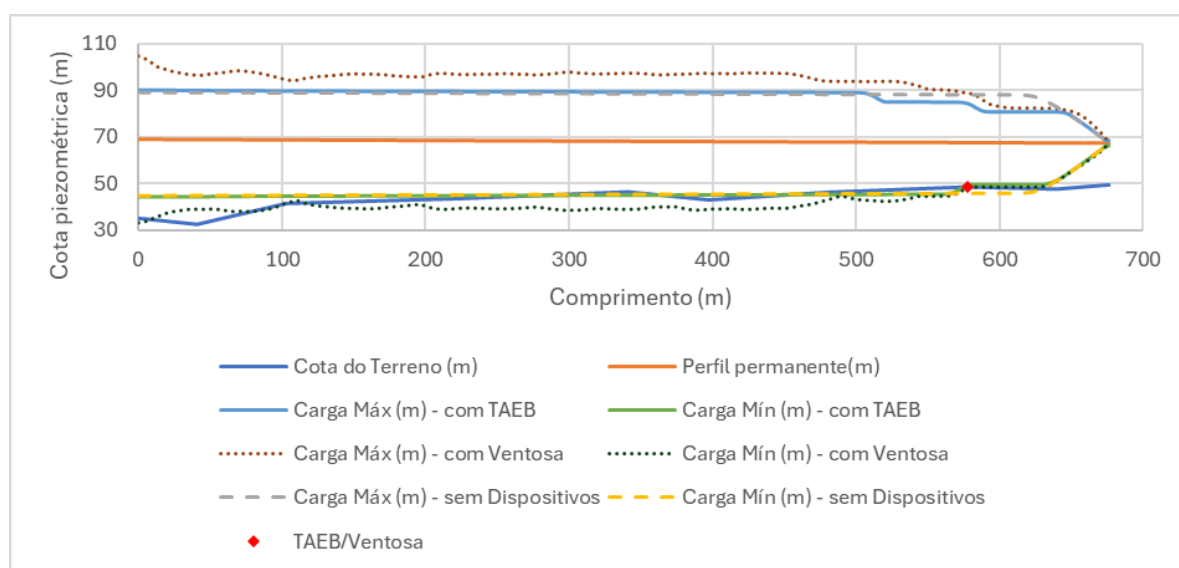
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Na seção da válvula de retenção, nota-se que a utilização da Ventosa gerou resultados negativos para a proteção contra o golpe de aríete, já que sempre há picos de sobrepressão e subpressão maiores do que na situação com o TAEB. Assim, comparando-se os dois dispositivos, o TAEB apresenta maiores vantagens na utilização do que a Ventosa para essa adutora. Em termos quantitativos, observou-se que a simulação com a Ventosa obteve um

valor de pressão máximo de 69,767 mca, quando a simulação atingiu o tempo aproximado de 11 segundos. A simulação com o TAEB, nesse mesmo tempo, retornou um valor de pressão de 51,843 mca, ou seja, a Ventosa promoveu uma sobrepressão 17,924 mca maior que o TAEB nessa seção.

Para comparação entre as envoltórias obtidas nas três simulações, foi gerada a Figura 95.

Figura 95 – Comparação das envoltórias máximas e mínimas nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Ventosa na Adutora de Alcântara/MA



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Por fim, analisando-se as envoltórias, pode-se concluir definitivamente que a Ventosa não é o dispositivo mais adequado para essa adutora, pois afetou negativamente ambas as envoltórias máximas e mínimas. O TAEB, por outro lado, se mostrou um dispositivo bastante eficiente, pois combateu as subpressões de maneira satisfatória e também atuou na atenuação das sobrepressões. Além disso, o TAEB não prejudicou as pressões a montante do nó onde está instalado, algo que foi observado na simulação com a Ventosa.

Em termos quantitativos, é possível observar os resultados de pressões máximas e mínimas das simulações realizadas na Adutora de Alcântara/MA na Tabela 42.

Tabela 42 – Pressões máximas e mínimas da Adutora de Alcântara/MA – Comparação com Ventosa

Nós	Contorno	Simulação sem Dispositivos – MOC Cavitação		Simulação com TAEB – MOC Cavitação		Simulação com Ventosa – MOC Cavitação		Comparação – TAEB e Ventosa	
		Pressão Máx (mca)	Pressão Mín (mca)	Pressão Máx (mca)	Pressão Máx (mca)	Pressão Mín (mca)	Pressão Máx (mca)	$\Delta P_{\min}$ (mca)	$\Delta P_{\max}$ (mca)
15	Junção	-2,658	-6,280	-2,732	-6,148	-2,732	-6,148	0,000	0,000
14	Bomba	33,950	9,666	33,950	9,195	33,950	-2,006	11,201	0,000
13	Bomba	33,950	9,666	33,950	9,195	33,950	-2,006	11,201	0,000
10	Reservatório de Nível Fixo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
16	Válvula de Retenção	54,105	9,669	55,117	9,195	69,758	-1,970	11,165	-14,641
18	Junção	54,100	9,670	55,117	9,195	69,740	-1,970	11,165	-14,623
17	Válvula de Retenção	54,105	9,669	55,117	9,195	69,758	-1,970	11,165	-14,641
9	Junção	56,636	12,348	57,570	11,870	64,174	6,446	5,424	-6,604
8	Junção	47,583	3,512	48,400	3,161	53,313	-0,061	3,222	-4,913
7	Junção	45,278	1,621	46,059	1,273	53,483	-4,230	5,503	-7,424
6	Junção	42,167	-1,101	42,942	-1,443	51,069	-7,557	6,114	-8,127
5	Junção	45,535	2,464	46,303	2,123	54,361	-4,016	6,139	-8,058
4	Junção	42,133	-0,649	42,917	-0,988	47,843	-3,259	2,271	-4,926
3	TAEB/Ventosa	39,643	-2,796	35,884	0,994	40,471	-0,010	1,004	-4,587
2	Junção	35,349	3,566	33,154	3,781	34,538	3,415	0,366	-1,384
19	Junção	19,158	16,837	19,164	16,862	20,003	16,560	0,302	-0,839
1	Reservatório de Nível Fixo	18,020	18,020	18,020	18,020	18,020	18,020	0,000	0,000

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Ao realizar a comparação entre a Simulação com TAEB – MOC Cavitação e a Simulação com Ventosa – MOC Cavitação, observou-se uma diferença média de 5,073 mca nas subpressões e -5,339 mca nas sobrepressões, indicando que o TAEB foi mais efetivo que a Ventosa no combate tanto às pressões máximas quanto mínimas. Ademais, a Ventosa promoveu um aumento de 141,80% nas subpressões e 11,61% nas sobrepressões, piorando a situação da adutora quando comparada com a simulação sem dispositivos.

A maior diferença encontrada nas subpressões entre as duas simulações foi nos nós 13 e 14, que correspondem às bombas, devido ao fato de a Ventosa ter afetado bastante as

envoltórias a montante de onde foi instalada, enquanto que o TAEB não apresentou esse comportamento. A diferença obtida nas subpressões foi de 11,201 mca. No caso das subpressões, a maior diferença entre as duas simulações foi no nó 18, logo a jusante das válvulas de retenção, cujo valor foi de -14,623 mca.

Além disso, nessa adutora, também se conclui que o maior ganho na adoção do TAEB em relação à Ventosa foi a estabilidade nos picos de pressão e vazão.

4.3.3. Comparação com Chaminé de Equilíbrio

A Chaminé de Equilíbrio que foi adotada para a simulação nesta adutora foi posicionada no mesmo nó onde foram locados o TAEB e a Ventosa e apresentou os dados de entrada exibidos na Tabela 43, obtidos a partir do pré-dimensionamento realizado no UFC 7.

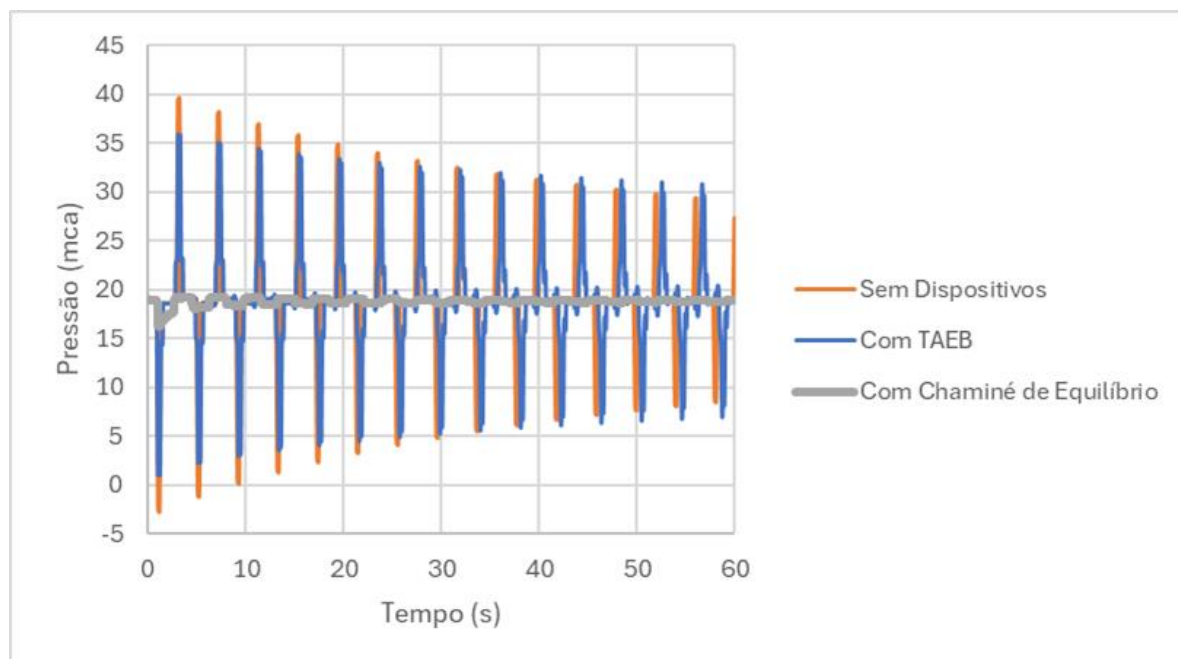
Tabela 43 – Dados da Chaminé de Equilíbrio simulada na Adutora de Alcântara/MA

Dados de entrada da Chaminé de Equilíbrio	
Diâmetro (m)	2,00
Nível Máximo de Água (m)	18,93
Coeficiente de Perda Localizada	3,10

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Com essa Chaminé, a parada do conjunto motobomba trouxe os resultados apresentados na Figura 96, que traz a comparação entre as pressões obtidas nas simulações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio na seção onde os dispositivos foram instalados.

Figura 96 – Comparação da pressão na seção do TAEB nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio na Adutora de Alcântara/MA

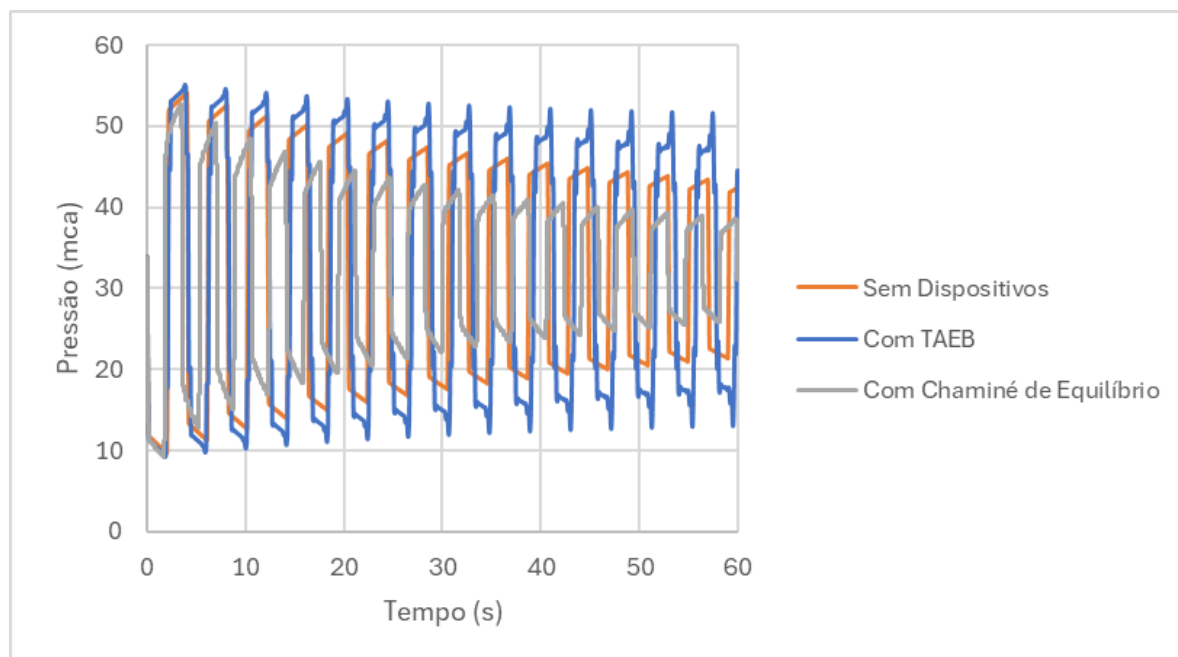


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Observa-se novamente o comportamento da Chaminé de Equilíbrio na seção onde é instalada, ou seja, ela consegue sustentar a pressão em torno do valor do seu nível máximo de água, que foi 18,93 mca nesse caso, assim como evita picos de subpressão e sobrepressão ao longo do tempo, o que garante uma grande estabilidade e proteção contra os transientes. O valor médio da pressão obtido na simulação com a Chaminé foi de 18,760 mca. O TAEB, por sua vez, não permitiu que a pressão mínima ultrapasse o valor do rebaixamento máximo de água na estrutura do dispositivo.

Na seção da válvula de retenção, obtiveram-se os resultados de pressão presentes na Figura 97, que permite realizar a comparação entre as simulações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio.

Figura 97 – Comparação da pressão na seção da válvula de retenção nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio na Adutora de Alcântara/MA

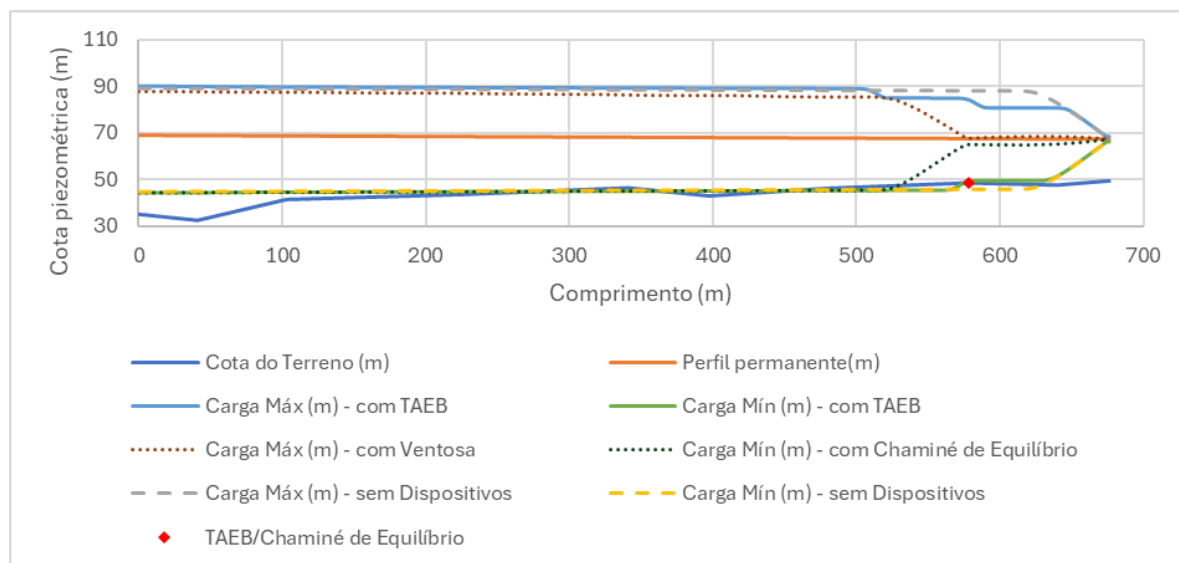


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Nessa seção, observa-se que o TAEB apresentou um desempenho pior que a Chaminé de Equilíbrio, que conseguiu efetivamente combater os picos de subpressão e sobrepressão ao longo do tempo. Em média, a pressão na seção da válvula de retenção na simulação realizada com a Chaminé foi de 31,987 mca.

As simulações permitiram gerar as envoltórias apresentadas na Figura 98, que traz a comparação entre as três situações simuladas.

Figura 98 – Comparação das envoltórias máximas e mínimas nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio na Adutora de Alcântara/MA



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Pela visualização das envoltórias, observa-se que a Chaminé de Equilíbrio trouxe resultados bastantes positivos no combate ao transiente, especialmente a jusante de onde foi instalada. Além disso, pelo fato de ter sido adicionado um dispositivo com 18,93 metros de altura, há um acréscimo na linha piezométrica que afeta as seções a montante de onde ela foi instalada. Comparando-se com o TAEB, que tem apenas 1,00 metro de altura, esse efeito é bastante reduzido. Entretanto, comparando-se a atuação de ambos os dispositivos a montante de onde foram instalados, nota-se que não há grandes diferenças nas envoltórias, com exceção do efeito da elevação da linha piezométrica do sistema hidráulico. Ressalta-se que, com os dois dispositivos, o principal ganho de combate ao transiente foi nas seções a jusante do nó onde foram posicionados.

Por fim, pode-se comparar as pressões máximas e mínimas envolvidas nas duas simulações a partir da interpretação da Tabela 44.

Tabela 44 – Pressões máximas e mínimas da Adutora de Alcântara/MA – Comparação com Chaminé de Equilíbrio

Nós	Contorno	Simulação sem Dispositivos – MOC Cavitação		Simulação com TAEB – MOC Cavitação		Simulação com Chaminé de Equilíbrio – MOC Cavitação		Comparação – TAEB e Chaminé de Equilíbrio	
		Pressão Máx (mca)	Pressão Mín (mca)	Pressão Máx (mca)	Pressão Máx (mca)	Pressão Mín (mca)	Pressão Máx (mca)	$\Delta P_{\min}$ (mca)	$\Delta P_{\max}$ (mca)
15	Junção	-2,658	-6,280	-2,732	-6,148	-2,732	-6,148	0,000	0,000
14	Bomba	33,950	9,666	33,950	9,195	33,950	9,244	-0,049	0,000
13	Bomba	33,950	9,666	33,950	9,195	33,950	9,244	-0,049	0,000
10	Reservatório de Nível Fixo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
16	Válvula de Retenção	54,105	9,669	55,117	9,195	52,834	9,245	-0,050	2,283
18	Junção	54,100	9,670	55,117	9,195	52,834	9,246	-0,051	2,283
17	Válvula de Retenção	54,105	9,669	55,117	9,195	52,834	9,245	-0,050	2,283
9	Junção	56,636	12,348	57,570	11,870	55,271	11,925	-0,055	2,299
8	Junção	47,583	3,512	48,400	3,161	46,138	3,091	0,070	2,262
7	Junção	45,278	1,621	46,059	1,273	43,618	1,202	0,071	2,441
6	Junção	42,167	-1,101	42,942	-1,443	39,935	-1,373	-0,070	3,007
5	Junção	45,535	2,464	46,303	2,123	43,163	2,194	-0,071	3,140
4	Junção	42,133	-0,649	42,917	-0,988	39,279	-0,917	-0,071	3,638
3	TAEB/ Chaminé de Equilíbrio	39,643	-2,796	35,884	0,994	19,235	16,281	-15,287	16,649
2	Junção	35,349	3,566	33,154	3,781	20,871	17,636	-13,855	12,283
19	Junção	19,158	16,837	19,164	16,862	18,145	17,841	-0,979	1,019
1	Reservatório de Nível Fixo	18,020	18,020	18,020	18,020	18,020	18,020	0,000	0,000

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Comparando-se a Simulação com TAEB – MOC Cavitação e a Simulação com Chaminé de Equilíbrio – MOC Cavitação, houve uma diferença média de -1,794 mca em termos de subpressão e de 3,152 mca em termos de sobrepressão. Assim, para essa adutora, a Chaminé de Equilíbrio foi mais efetiva que o TAEB tanto no combate às subpressões como sobrepressões. Além disso, a Chaminé promoveu um alívio de 59,05% nas subpressões e 8,37% nas sobrepressões em comparação com a simulação sem dispositivos.

Portanto, o nó onde o TAEB foi posicionado foi o 9, cujo valor de subpressão foi de -8,77 mca. O TAEB foi simulado com os dados de entrada apresentados na Tabela 45.

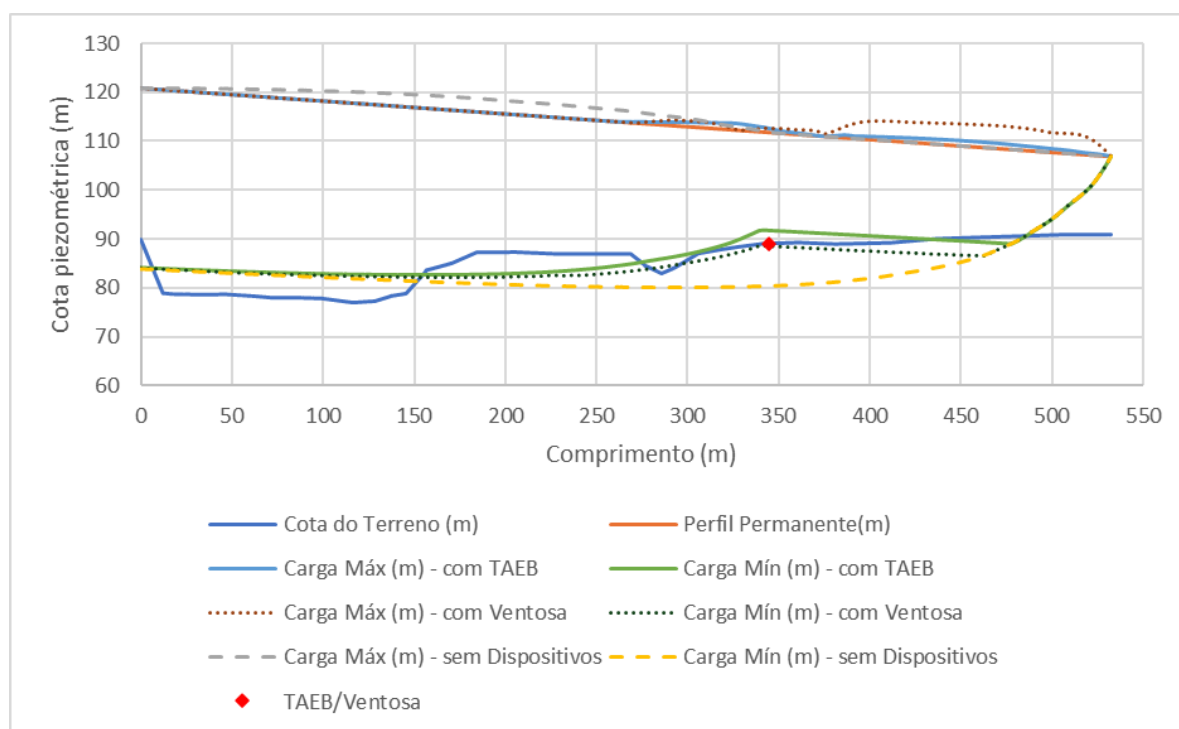
Tabela 45 – Dados do TAEB simulado na Adutora de Acaraú/CE

Dados de entrada do TAEB	
Diâmetro (mm)	300
Comprimento (m)	3,0
Coefficiente de Perda Localizada	5,50
Diâmetro da Ventosa (mm)	25
Área do Orifício Cinético (mm ²)	506,70
Coefficiente de Admissão de Ar	0,590
Coefficiente de Expulsão de Ar	0,990
Temperatura Interna (°C)	25,00
Temperatura Externa (°C)	24,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Assim, com a parada do conjunto motobomba, pode-se comparar as envoltórias obtidas pa atuação do TAEB e da Ventosa a partir dos dados apresentados na Figura 100.

Figura 100 – Comparação das envoltórias máximas e mínimas nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Ventosa na Adutora de Acaraú/CE



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

49	Válvula de Retenção	30,935	-6,167	30,910	-5,783	30,910	-6,018	0,235	0,000
54	Junção	30,932	-6,171	30,910	-5,786	30,910	-6,021	0,235	0,000
52	Válvula de Retenção	30,935	-6,167	30,910	-5,783	30,910	-6,018	0,235	0,000
50	Válvula de Retenção	30,935	-6,167	30,910	-5,783	30,910	-6,018	0,235	0,000
51	Válvula de Retenção	30,935	-6,167	30,910	-5,783	30,910	-6,018	0,235	0,000
53	Válvula de Retenção	30,935	-6,167	30,910	-5,783	30,910	-6,018	0,235	0,000
36	Junção	41,986	4,677	41,659	5,092	41,659	4,807	0,285	0,000
35	Junção	42,202	4,773	41,696	5,213	41,696	4,897	0,316	0,000
34	Junção	42,218	4,604	41,419	5,085	41,419	4,710	0,375	0,000
33	Junção	42,125	4,306	40,984	4,843	40,984	4,384	0,459	0,000
32	Junção	42,374	4,399	40,954	5,000	40,954	4,517	0,483	0,000
31	Junção	42,655	4,570	41,026	5,230	41,026	4,733	0,497	0,000
30	Junção	42,534	4,341	40,679	5,076	40,679	4,560	0,516	0,000
29	Junção	42,548	4,267	40,466	5,111	40,466	4,568	0,543	0,000
28	Junção	43,192	4,838	40,867	5,846	40,867	5,259	0,587	0,000
27	Junção	42,715	4,353	40,263	5,494	40,263	4,878	0,616	0,000
26	Junção	41,455	3,106	38,913	4,363	38,913	3,726	0,637	0,000
25	Junção	40,872	2,538	38,259	3,897	38,259	3,241	0,656	0,000
24	Junção	35,789	-2,495	33,093	-0,966	33,093	-1,652	0,686	0,000
23	Junção	34,117	-4,065	31,360	-2,322	31,360	-3,047	0,725	0,000
22	Junção	31,522	-6,495	28,759	-4,499	28,759	-5,273	0,774	0,000
21	Junção	30,848	-6,819	28,135	-4,345	28,135	-5,199	0,854	0,000
20	Junção	30,726	-6,765	28,029	-4,010	28,029	-4,965	0,955	0,000
19	Junção	30,592	-6,703	27,916	-3,621	27,916	-4,568	0,947	0,000
18	Junção	29,939	-6,830	27,414	-2,981	27,414	-4,397	1,416	0,000
17	Junção	29,520	-6,899	27,070	-2,420	27,070	-3,977	1,557	0,000
16	Junção	29,207	-6,933	27,036	-2,029	26,862	-3,674	1,645	0,174
15	Junção	31,279	-4,473	29,508	0,980	29,496	-0,807	1,787	0,012
14	Junção	32,391	-2,969	31,005	3,027	31,272	1,153	1,874	-0,267
13	Junção	31,000	-4,081	29,882	2,349	30,348	0,485	1,864	-0,466
12	Junção	27,341	-7,056	26,805	0,369	27,034	-1,681	2,050	-0,229
11	Junção	25,708	-7,798	25,945	0,718	25,583	-1,605	2,323	0,362
10	Junção	24,448	-8,339	25,165	1,502	23,806	-1,231	2,733	1,359
9	TAEB/ Ventosa	23,030	-8,824	23,859	2,731	23,615	-0,561	3,292	0,244
8	Junção	22,092	-8,758	22,392	2,150	23,050	-1,183	3,333	-0,658
7	Junção	21,875	-7,896	22,170	2,052	23,256	-1,260	3,312	-1,086
6	Junção	20,847	-6,816	21,618	1,195	24,863	-2,051	3,246	-3,245
5	Junção	19,345	-6,023	20,375	-0,163	23,647	-3,307	3,144	-3,272

4	Junção	18,507	-4,294	19,599	-0,892	23,073	-3,876	2,984	-3,474
3	Junção	17,728	-1,365	18,718	-1,361	22,356	-1,422	0,061	-3,638
2	Junção	16,751	4,415	17,461	4,414	20,786	4,376	0,038	-3,325
55	Junção	16,016	14,705	16,142	14,705	16,760	14,701	0,004	-0,618
1	Reservatório de Nível Fixo	16,000	16,000	16,000	16,000	16,000	16,000	0,000	0,000

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Comparando-se a Simulação com TAEB – MOC Cavitação com a Simulação com Ventosa – MOC Cavitação, obteve-se uma diferença média de 1,004 mca nas subpressões e -0,362 mca nas sobrepressões. Comparativamente, o TAEB promoveu um alívio de 46,97% nas subpressões e 3,60% nas sobrepressões, enquanto que a Ventosa atenuou as subpressões em 28,65% e as sobrepressões em 0,08%. Assim, conclui-se que o TAEB foi mais efetivo que a Ventosa no combate às subpressões e às sobrepressões.

As maiores diferenças encontradas entre as subpressões das duas simulações foram nos nós 7 e 8, e esses valores foram de 3,333 e 3,312 mca, respectivamente. Esses nós encontram-se logo a jusante do nó do TAEB, indicando sua atuação significativa principalmente nos trechos a jusante de onde ele foi instalado. Já no caso das sobrepressões, a maior diferença obtida entre as duas simulações foi de -3,638 mca no nó 3, também localizado a jusante do nó do TAEB.

4.4.2. Comparação com Chaminé de Equilíbrio

A Chaminé de Equilíbrio que foi adotada para a simulação nesta adutora foi posicionada no mesmo nó onde foram locados o TAEB e a Ventosa e apresentou os dados de entrada apresentados na Tabela 47, determinados pelo pré-dimensionamento do UFC 7.

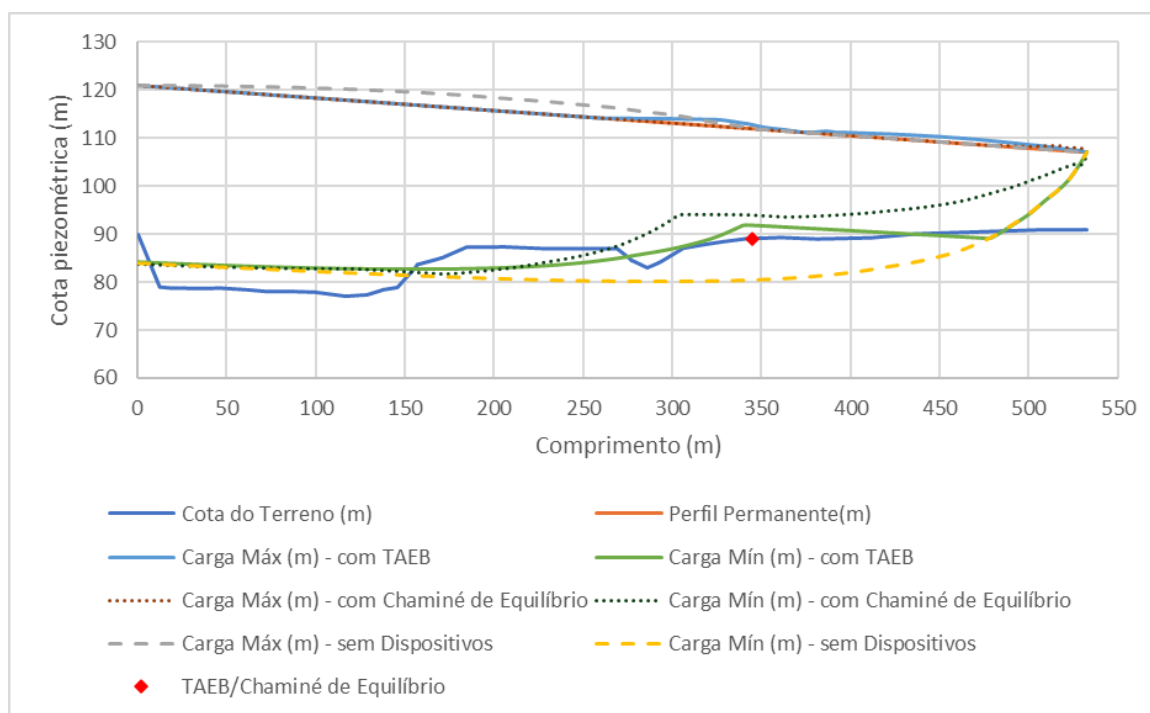
Tabela 47 – Dados da Chaminé de Equilíbrio simulada na Adutora de Acaraú/CE

Dados de entrada da Chaminé de Equilíbrio	
Diâmetro (m)	2,00
Nível Máximo de Água (m)	18,941
Coefficiente de Perda Localizada	4,53

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Com essa Chaminé, foi realizada a simulação da parada do conjunto motobomba, obtendo-se a comparação entre as envoltórias das simulações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio representadas na Figura 101.

Figura 101 – Comparação das envoltórias máximas e mínimas nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio na Adutora de Acaraú/CE



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A inserção da Chaminé de Equilíbrio na adutora apresentou o efeito da elevação da linha piezométrica, o que provocou a elevação da envoltória de mínimas iniciando-se em 225 metros de extensão, aproximadamente. Ademais, o efeito da Chaminé foi propagado para as seções a jusante de onde ela foi instalada, de forma semelhante ao que ocorreu com o TAEB. Porém, a Chaminé apresentou um efeito melhor de combate às subpressões comparando-se com o TAEB, devido à altura bem mais elevada em que ela foi instalada. A Chaminé também combateu efetivamente as sobrepressões, igualando a envoltória de máximas com o perfil permanente. No entanto, observa-se que o efeito do TAEB foi bem semelhante ao da Chaminé, havendo poucas diferenças de atuação dos dois dispositivos. Em relação às sobrepressões, praticamente os dois dispositivos atuaram da mesma forma, e considerando-se as subpressões, a Chaminé conseguiu ser mais efetiva devido à elevada altura em relação ao TAEB.

Por fim, é possível verificar o desempenho de ambos os dispositivos em termos de pressões máximas e mínimas atingidas nas simulações a partir da Tabela 48.

Tabela 48 – Pressões máximas e mínimas da Adutora de Acaraú/CE – Comparação com Chaminé de Equilíbrio

Nós	Contorno	Simulação sem Dispositivos – MOC Cavitação		Simulação com TAEB – MOC Cavitação		Simulação com Chaminé de Equilíbrio – MOC Cavitação		Comparação – TAEB e Chaminé de Equilíbrio	
		Pressão Máx (mca)	Pressão Mín (mca)	Pressão Máx (mca)	Pressão Máx (mca)	Pressão Mín (mca)	Pressão Máx (mca)	$\Delta P_{\min}$ (mca)	$\Delta P_{\max}$ (mca)
48	Junção	1,204	-0,498	1,242	-0,266	1,204	-1,231	0,965	0,038
47	Bomba	30,910	-6,157	30,910	-5,776	30,910	-6,195	0,419	0,000
46	Bomba	30,910	-6,157	30,910	-5,776	30,910	-6,195	0,419	0,000
45	Bomba	30,910	-6,157	30,910	-5,776	30,910	-6,195	0,419	0,000
44	Bomba	30,910	-6,157	30,910	-5,776	30,910	-6,195	0,419	0,000
43	Bomba	30,910	-6,157	30,910	-5,776	30,910	-6,195	0,419	0,000
37	Reservatório de Nível Fixo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
49	Válvula de Retenção	30,935	-6,167	30,910	-5,783	30,910	-6,202	0,419	0,000
54	Junção	30,932	-6,171	30,910	-5,786	30,910	-6,204	0,418	0,000
52	Válvula de Retenção	30,935	-6,167	30,910	-5,783	30,910	-6,202	0,419	0,000
50	Válvula de Retenção	30,935	-6,167	30,910	-5,783	30,910	-6,202	0,419	0,000
51	Válvula de Retenção	30,935	-6,167	30,910	-5,783	30,910	-6,202	0,419	0,000
53	Válvula de Retenção	30,935	-6,167	30,910	-5,783	30,910	-6,202	0,419	0,000
36	Junção	41,986	4,677	41,659	5,092	41,659	4,688	0,404	0,000
35	Junção	42,202	4,773	41,696	5,213	41,696	4,814	0,399	0,000
34	Junção	42,218	4,604	41,419	5,085	41,419	4,709	0,376	0,000
33	Junção	42,125	4,306	40,984	4,843	40,984	4,503	0,340	0,000
32	Junção	42,374	4,399	40,954	5,000	40,954	4,701	0,299	0,000
31	Junção	42,655	4,570	41,026	5,230	41,026	4,976	0,254	0,000
30	Junção	42,534	4,341	40,679	5,076	40,679	4,886	0,190	0,000
29	Junção	42,548	4,267	40,466	5,111	40,466	5,005	0,106	0,000
28	Junção	43,192	4,838	40,867	5,846	40,867	5,844	0,002	0,000
27	Junção	42,715	4,353	40,263	5,494	40,263	5,375	0,119	0,000
26	Junção	41,455	3,106	38,913	4,363	38,913	4,075	0,288	0,000
25	Junção	40,872	2,538	38,259	3,897	38,259	3,463	0,434	0,000
24	Junção	35,789	-2,495	33,093	-0,966	33,093	-1,646	0,680	0,000
23	Junção	34,117	-4,065	31,360	-2,322	31,360	-3,307	0,985	0,000
22	Junção	31,522	-6,495	28,759	-4,499	28,759	-5,281	0,782	0,000
21	Junção	30,848	-6,819	28,135	-4,345	28,135	-4,518	0,173	0,000

20	Junção	30,726	-6,765	28,029	-4,010	28,029	-3,800	-0,210	0,000
19	Junção	30,592	-6,703	27,916	-3,621	27,916	-2,940	-0,681	0,000
18	Junção	29,939	-6,830	27,414	-2,981	27,414	-1,554	-1,427	0,000
17	Junção	29,520	-6,899	27,070	-2,420	27,070	-0,353	-2,067	0,000
16	Junção	29,207	-6,933	27,036	-2,029	26,862	0,526	-2,555	0,174
15	Junção	31,279	-4,473	29,508	0,980	29,132	4,218	-3,238	0,376
14	Junção	32,391	-2,969	31,005	3,027	30,432	7,150	-4,123	0,573
13	Junção	31,000	-4,081	29,882	2,349	29,138	7,387	-5,038	0,744
12	Junção	27,341	-7,056	26,805	0,369	25,799	6,950	-6,581	1,006
11	Junção	25,708	-7,798	25,945	0,718	24,701	6,176	-5,458	1,244
10	Junção	24,448	-8,339	25,165	1,502	23,806	5,546	-4,044	1,359
TAEB/									
9	Chaminé de Equilíbrio	23,030	-8,824	23,859	2,731	22,854	4,889	-2,158	1,005
8	Junção	22,092	-8,758	22,392	2,150	22,088	4,235	-2,085	0,304
7	Junção	21,875	-7,896	22,170	2,052	21,867	4,702	-2,650	0,303
6	Junção	20,847	-6,816	21,618	1,195	20,840	5,155	-3,960	0,778
5	Junção	19,345	-6,023	20,375	-0,163	19,338	5,255	-5,418	1,037
4	Junção	18,507	-4,294	19,599	-0,892	18,507	6,179	-7,071	1,092
3	Junção	17,728	-1,365	18,718	-1,361	17,766	7,864	-9,225	0,952
2	Junção	16,751	4,415	17,461	4,414	17,253	10,579	-6,165	0,208
55	Junção	16,016	14,705	16,142	14,705	16,627	13,618	1,087	-0,485
Reservatório									
1	de Nível Fixo	16,000	16,000	16,000	16,000	16,000	16,000	0,000	0,000

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Comparando-se a Simulação com TAEB – MOC Cavitação com a Simulação com Chaminé de Equilíbrio – MOC Cavitação, obteve-se uma diferença média de -1,233 mca nas subpressões e 0,214 mca nas sobrepressões. Assim, conclui-se que a Chaminé foi mais efetiva que o TAEB no combate às subpressões e às sobrepressões. Em termos percentuais, o TAEB aliviou as subpressões em 46,97% e as sobrepressões em 3,60%, enquanto que a Chaminé trouxe um alívio de 76,23% nas subpressões e 3,30% nas sobrepressões.

A maior diferença encontrada entre as subpressões das duas simulações foi no nó 12, onde foi obtida uma diferença de -6,581 mca. Esse nó se encontra próximo à Chaminé, a montante de onde ela foi instalada. Já no caso das sobrepressões, a maior diferença obtida entre as duas simulações foi de 1,359 mca no nó 10, também localizado a montante do nó da Chaminé.

Para essa adutora, conclui-se novamente que, mesmo a Chaminé de Equilíbrio tendo sido mais efetiva que o TAEB, ela precisou de uma grande altura para permitir esse efeito.

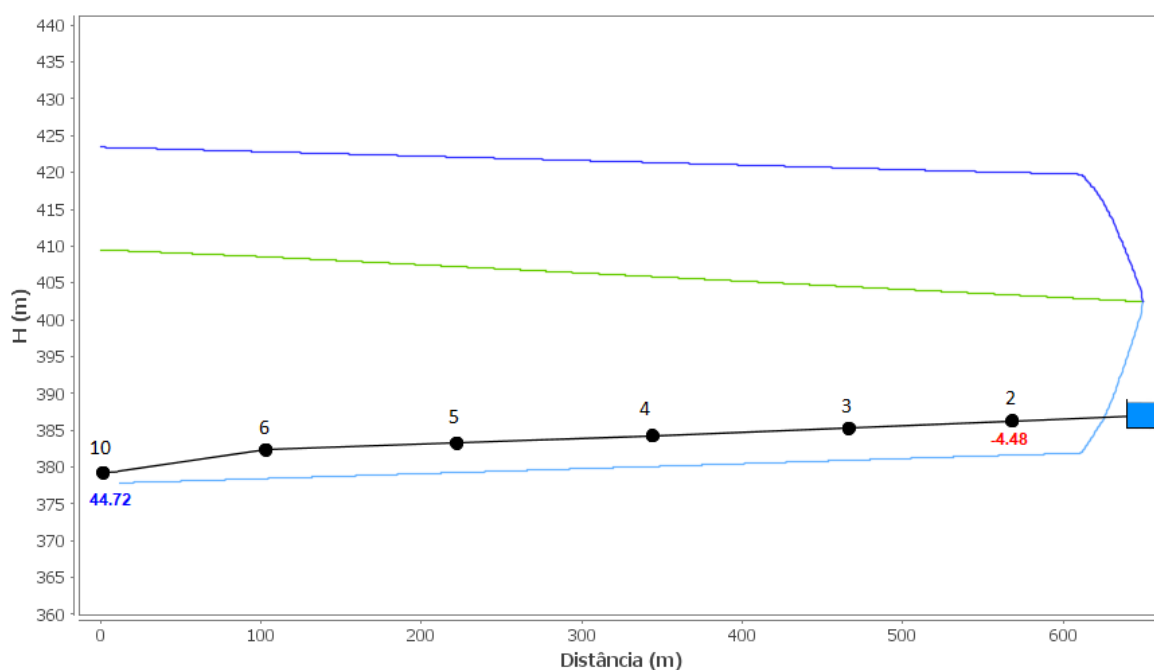
Dessa forma, o TAEB, com apenas 3,00 metros de altura nessa simulação, apresentou um comportamento bastante interessante no combate ao transiente, uma vez que a diferença média entre as duas simulações foi menos de 2 mca.

4.5. Adutora do Loteamento Araripina/PE

4.5.1. Comparação com Ventosa

Sem nenhum dispositivo e utilizando o MOC, obteve-se o resultado da Figura 102, sendo possível identificar o nó com a menor subpressão para o posicionamento do TAEB e da Ventosa.

Figura 102 – Simulação da Adutora do Loteamento Araripina/PE com o MOC no UFC 7 sem dispositivos de proteção



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Assim, o nó selecionado para a instalação do TAEB foi o 2, cuja subpressão foi de -4,68 mca. O TAEB foi simulado com os dados de entrada da Tabela 49.

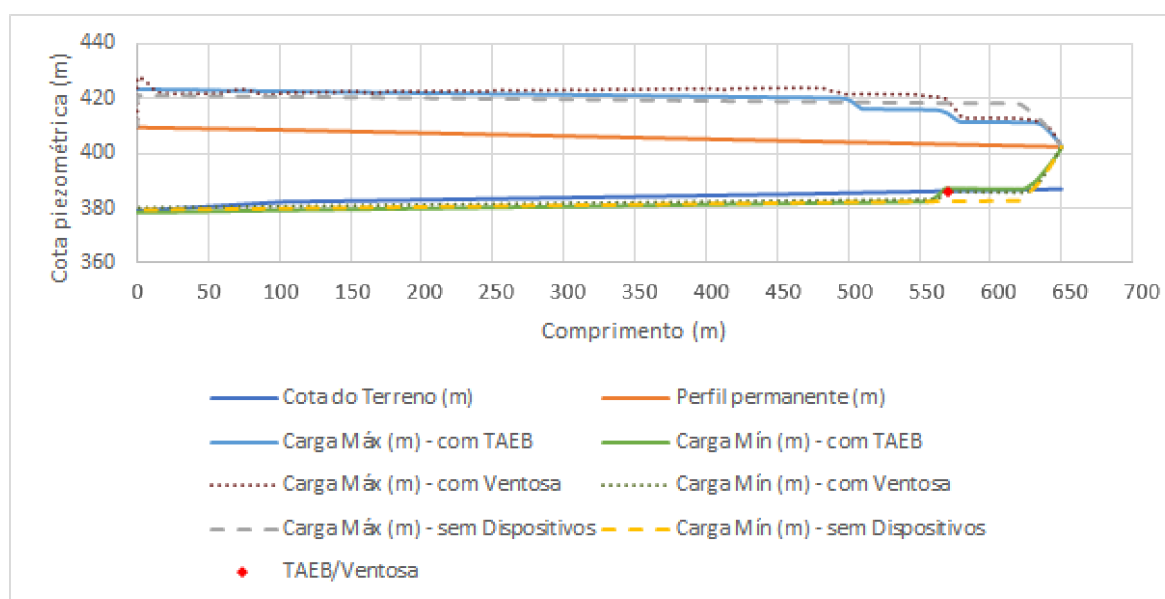
Tabela 49 – Dados do TAEB simulado na Adutora do Loteamento Araripina/PE

Dados de entrada do TAEB	
Diâmetro (mm)	100
Comprimento (m)	1,0
Coeficiente de Perda Localizada	5,50
Diâmetro da Ventosa (mm)	25
Área do Orifício Cinético (mm ²)	506,70
Coeficiente de Admissão de Ar	0,590
Coeficiente de Expulsão de Ar	0,990
Temperatura Interna (°C)	25,00
Temperatura Externa (°C)	24,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Assim, com a parada do conjunto motobomba, obteve-se a comparação de envoltórias entre a atuação do TAEB e da Ventosa apresentada na Figura 103.

Figura 103 – Comparação das envoltórias máximas e mínimas nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Ventosa na Adutora do Loteamento Araripina/PE



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Nessa adutora, também foi evidenciada a vantagem da utilização do TAEB em relação à Ventosa. Em relação às subpressões, a Ventosa apresentou praticamente o mesmo comportamento que o TAEB, com a diferença de que o TAEB elevou a subpressão para o valor correspondente à altura do rebaixamento máximo do nível de água que ocorre durante a simulação no local onde ele foi instalado. Em relação às sobrepressões, a Ventosa trouxe

resultados piores que o TAEB. O TAEB, portanto, atuou na redução das subpressões e conseguiu refletir esse resultado para as sobrepressões após o choque com a coluna líquida do reservatório de jusante. Assim, o TAEB atuou de forma mais abrangente que a Ventosa.

A Tabela 50 permite a comparação quantitativa entre os resultados obtidos nas simulações para esse caso.

Tabela 50 – Pressões máximas e mínimas da Adutora do Loteamento Araripina/PE –
Comparação com Ventosa

Nós	Contorno	Simulação sem Dispositivos – MOC Cavitação		Simulação com TAEB – MOC Cavitação		Simulação com Ventosa – MOC Cavitação		Comparação – TAEB e Ventosa	
		Pressão Máx (mca)	Pressão Mín (mca)	Pressão Máx (mca)	Pressão Máx (mca)	Pressão Mín (mca)	Pressão Máx (mca)	$\Delta P_{\min}$ (mca)	$\Delta P_{\max}$ (mca)
7	Reservatório de Nível Fixo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
9	Bomba	30,720	-1,138	30,720	-0,495	30,720	-6,200	5,705	0,000
10	Válvula de Retenção	44,721	-1,115	44,380	-0,489	50,320	-6,217	5,728	-5,940
6	Junção	40,701	-3,788	40,309	-3,097	41,751	-10,007	6,910	-1,442
5	Junção	39,067	-3,864	38,648	-3,166	43,246	-10,007	6,841	-4,598
4	Junção	37,366	-3,985	36,936	-3,273	42,447	-8,634	5,361	-5,511
3	Junção	35,581	-4,119	35,172	-3,398	40,576	-8,829	5,431	-5,404
2	TAEB/Ventosa	33,890	-4,475	28,720	0,893	34,752	-0,071	0,964	-6,032
11	Junção	17,314	13,341	17,286	13,341	19,015	11,104	2,237	-1,729
1	Reservatório de Nível Fixo	15,500	15,500	15,500	15,500	15,500	15,500	0,000	0,000

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Realizando-se a comparação entre a Simulação com TAEB – MOC Cavitação com a Simulação com Ventosa – MOC Cavitação, foi obtida uma diferença média de 3,918 mca nas subpressões e -3,066 mca nas sobrepressões. O TAEB promoveu um alívio de 33,81% nas subpressões e 2,28% nas sobrepressões comparando-se com a simulação sem dispositivos. Dessa forma, conclui-se que o TAEB foi mais efetivo que a Ventosa no combate a ambas as envoltórias.

A maior diferença encontrada nas subpressões das duas simulações foi no nó 6, ou seja, logo a jusante da válvula de retenção, obtendo-se um valor de 6,910 mca. No caso das

sobrepressões, a maior diferença encontrada foi no nó 2, ou seja, no próprio nó onde os dispositivos foram inseridos, cujo valor foi de -6,032 mca. A Ventosa, nessa simulação, promoveu um aumento nas sobrepressões em relação ao TAEB, em especial a montante de onde foi instalada. Já nas subpressões, a principal diferença na atuação dos dois dispositivos foi a presença do tubo prolongado preenchido por água do TAEB, que conseguiu elevar ainda mais a subpressão se comparada à Ventosa.

4.5.2. Comparação com Chaminé de Equilíbrio

A Chaminé de Equilíbrio utilizada na simulação nesta adutora foi posicionada no mesmo nó dos outros dois dispositivos e apresentou os dados de entrada determinados pelo pré-dimensionamento do UFC 7 e exibidos na Tabela 51.

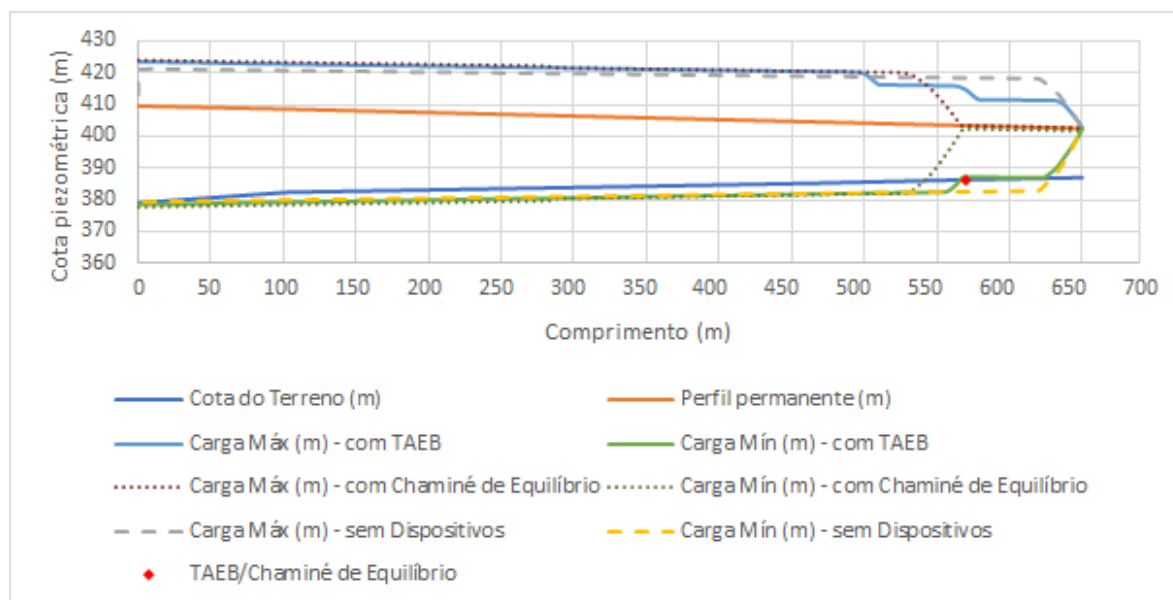
Tabela 51 – Dados da Chaminé de Equilíbrio simulada na Adutora do Loteamento Araripina/PE

Dados de entrada da Chaminé de Equilíbrio	
Diâmetro (m)	2,00
Nível Máximo de Água (m)	16,375
Coefficiente de Perda Localizada	3,10

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Com essa Chaminé, foi realizada a simulação da parada do conjunto motobomba, obtendo-se a comparação entre as envoltórias do TAEB e da Chaminé ilustrada na Figura 104.

Figura 104 – Comparação das envoltórias máximas e mínimas nas situações sem Dispositivos, com TAEB e com Chaminé de Equilíbrio na Adutora do Loteamento Araripina/PE



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Comparando-se a atuação de ambos os dispositivos, percebe-se que a Chaminé de Equilíbrio apresentou um efeito bastante expressivo no combate às subpressões e sobrepressões a jusante de onde foi instalada, praticamente igualando essas duas envoltórias ao perfil permanente da adutora. O TAEB, em contrapartida, apenas elevou a envoltória de mínima a montante nas proximidades de onde foi instalado e sustentou essa carga até o choque com o reservatório de jusante. Após isso, ocorre a reflexão da onda e amortecimento das envoltórias máximas. Observa-se, também, que do início da adutora até aproximadamente 500 metros de extensão, as envoltórias de máximas e mínimas dos dois dispositivos coincidem e essas duas também são bem próximas do valor das envoltórias sem nenhum dispositivo, ressaltando que o principal efeito do TAEB e da Chaminé de Equilíbrio apresenta-se nas seções a jusante de onde são instalados.

Para fins comparativos, a Tabela 52 traz as envoltórias máximas e mínimas obtidas com ambos os dispositivos para a simulação dessa adutora.

Tabela 52 – Pressões máximas e mínimas da Adutora do Loteamento Araripina/PE –
Comparação com Chaminé de Equilíbrio

Nós	Contorno	Simulação sem Dispositivos – MOC Cavitação		Simulação com TAEB – MOC Cavitação		Simulação com Chaminé de Equilíbrio – MOC Cavitação		Comparação – TAEB e Chaminé de Equilíbrio	
		Pressão Máx (mca)	Pressão Mín (mca)	Pressão Máx (mca)	Pressão Máx (mca)	Pressão Mín (mca)	Pressão Máx (mca)	$\Delta P_{\min}$ (mca)	$\Delta P_{\max}$ (mca)
7	Reservatório de Nível Fixo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
9	Bomba	30,720	-1,138	30,720	-0,495	30,720	-1,261	0,766	0,000
10	Válvula de Retenção	44,721	-1,115	44,380	-0,489	44,923	-1,253	0,764	-0,543
6	Junção	40,701	-3,788	40,309	-3,097	40,911	-3,935	0,838	-0,602
5	Junção	39,067	-3,864	38,648	-3,166	39,250	-4,002	0,836	-0,602
4	Junção	37,366	-3,985	36,936	-3,273	36,989	-3,449	0,176	-0,053
3	Junção	35,581	-4,119	35,172	-3,398	35,195	-3,583	0,185	-0,023
2	TAEB/Chaminé de Equilíbrio	33,890	-4,475	28,720	0,893	17,077	16,013	-15,120	11,643
11	Junção	17,314	13,341	17,286	13,341	15,686	14,744	-1,403	1,600
1	Reservatório de Nível Fixo	15,500	15,500	15,500	15,500	15,500	15,500	0,000	0,000

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Comparando-se a Simulação com TAEB – MOC Cavitação com a Simulação com Chaminé de Equilíbrio – MOC Cavitação, obteve-se uma diferença média de -1,296 mca nas subpressões e 1,142 mca nas sobrepressões. O TAEB promoveu um alívio percentual de 33,81% nas subpressões e 2,28% nas sobrepressões, enquanto que a Chaminé promoveu uma redução de 51,57% nas subpressões e 6,63% nas sobrepressões. Assim, conclui-se que a Chaminé foi mais efetiva que o TAEB no combate às subpressões e às sobrepressões.

A maior diferença encontrada entre as subpressões das duas simulações foi no nó 2, que corresponde ao nó onde os dois dispositivos foram inseridos. Essa diferença foi de -15,120 mca. Para as sobrepressões, a maior diferença obtida entre as duas simulações foi de 11,643 mca também no nó 2.

Novamente, conclui-se que a Chaminé de Equilíbrio, para ser mais eficiente que o TAEB, necessitou de grandes dimensões, o que a torna mais onerosa para implantação. O

TAEB, apesar de ter sido menos efetivo, apresentou uma diferença no alívio das sobrepressões e subpressões abaixo de 2 mca em toda a extensão da adutora comparando-se com a Chaminé.

4.6. Resumo Comparativo dos Resultados do TAEB frente aos Dispositivos Convencionais

Os resultados ao longo deste capítulo permitiram avaliar, de forma quantitativa e qualitativa, o desempenho do TAEB como dispositivo de alívio contra o golpe de aríete em diferentes configurações topográficas, operacionais e geométricas de adutoras. Com a aplicação do modelo validado em diferentes sistemas de adução, foi possível consolidar alguns padrões de utilização do TAEB.

Em todos os testes realizados, o TAEB atuou com eficácia na elevação das envoltórias mínimas de pressão no nó de sua instalação e nas suas proximidades. Ademais, ele sempre limitou a carga piezométrica ao valor da cota do terreno acrescido do rebaixamento máximo atingido em toda a simulação na estrutura do dispositivo.

Na Adutora da Fazenda Santa Maria, que foi a adutora mais extensa simulada, apresentando 1.974,44 m de extensão, enquanto que as outras possuem menos de 1 km, além de ser constituída quase na totalidade da sua extensão de tubulação com diâmetros de 125 e 150 mm, o TAEB reduziu a severidade das subpressões, relativamente, em 15,82% e eliminou a ocorrência de pressões abaixo da pressão de vapor da água no nó onde foi instalado, erradicando possíveis separações de coluna líquida. Nas Adutoras de Acaraú/CE e do Loteamento Araripina/PE, o alívio nas subpressões promovido pelo TAEB foi ainda mais expressivo, correspondendo a 46,97% e 33,81%, respectivamente. Mesmo em cenários onde a atenuação das subpressões foi reduzida, como na Adutora de Alcântara/MA e de Aurora/CE, o TAEB conseguiu elevar a envoltória de mínimas a jusante de onde foi instalado, protegendo as adutoras nesse local contra a cavitação.

Em relação às sobrepressões, a atuação do TAEB foi diferente a depender do perfil geométrico do sistema. Nos casos em que o TAEB piorou as sobrepressões (Adutora da Fazenda Santa Maria, de Aurora/CE e de Alcântara/MA), o aumento relativo promovido foi de menos de 10% quando comparado à simulação sem dispositivos e, além disso, não há comprometimento das classes de pressão do material das tubulações do qual as adutoras são constituídas. Já nas Adutoras de Acaraú/CE e do Loteamento Araripina/PE, o TAEB conseguiu aliviar, de forma reduzida, também as sobrepressões (3,60% e 2,28%, respectivamente). Portanto, mesmo com o aumento das envoltórias máximas, o TAEB ainda se mostrou um

dispositivo eficiente para ser utilizado nas adutoras simuladas neste trabalho devido ao combate efetivo às subpressões.

Quando comparado às Ventosas convencionais, o TAEB trouxe maior estabilidade nos picos de pressão. Nas simulações com Ventosa para a Adutora da Fazenda Santa Maria e de Alcântara/MA, esta afetou negativamente as envoltórias de subpressão a montante de onde foi instalada, aumentando as pressões mínimas na adutora. Em todos os casos simulados, o TAEB foi mais efetivo que a Ventosa no combate às subpressões e às sobrepressões.

Em comparação com a Chaminé de Equilíbrio, o TAEB foi menos efetivo em todos os casos simulados, exceto na simulação com a Chaminé de 3,00 metros de altura na Adutora de Aurora/CE. Entretanto, ressalta-se que para que a Chaminé fosse mais efetiva que o TAEB nas simulações, foram necessárias grandes dimensões de diâmetros e alturas, o que pode inviabilizar a sua utilização para qualquer sistema hidráulico.

Em síntese, os resultados obtidos evidenciam que o desempenho do TAEB é condicionado pelas características geométricas e hidráulicas de cada sistema, não devendo sua eficiência ser generalizada independentemente das condições específicas da adutora analisada. Ademais, o TAEB provou ser uma alternativa tecnicamente eficiente e de reduzido impacto econômico para o controle de subpressões e mitigação da cavitação em sistemas de adução de pequeno e médio portes. Nos casos testados neste trabalho, o TAEB foi eficiente para amortecer a inércia da coluna líquida após o desligamento da bomba, mesmo para a Adutora da Fazenda Santa Maria, que foi, dentre as simuladas, a adutora com os maiores desnível geométrico, extensão e diâmetro de tubulação. A aplicação do TAEB eliminou a instabilidade dos picos de pressão associados às Ventosas convencionais. Além disso, o TAEB consegue concorrer com grande vantagem econômica em comparação às Chaminés de Equilíbrio, aos Tanques de Alimentação Unidirecional e aos Reservatórios Hidropneumáticos. Contudo, conforme demonstrado pelas simulações no UFC 7, a eficiência do dispositivo é dependente do correto pré-dimensionamento de sua altura, do diâmetro da sua estrutura e das características da Ventosa instalada em sua extremidade superior, reforçando a necessidade da modelagem computacional na fase de projeto.

5. CONCLUSÕES

Por meio da exposição dos resultados obtidos por este trabalho, foi possível verificar o desempenho do TAEB no tocante à redução das pressões negativas na adutora, reduzindo potenciais ocorrências de cavitação. Dessa forma, o TAEB se mostrou uma solução tecnicamente eficiente para a atenuação das subpressões decorrentes do golpe de aríete nos sistemas de adução avaliados.

A principal contribuição metodológica do trabalho consistiu no desenvolvimento e na implementação computacional do modelo numérico do TAEB, obtido pela compatibilização dos modelos de Ventosa e Chaminé de Equilíbrio e incorporada ao UFC 7 para simulação de transientes hidráulicos com cavitação.

A validação do modelo deste trabalho foi realizada por meio de experimento desenvolvido na Adutora da Fazenda Santa Maria, construída no município de Presidente Olegário, em Minas Gerais. O arranjo experimental consistiu da instalação do TAEB a aproximadamente 1,6 km da extremidade de montante da adutora e foi avaliado o rebaixamento máximo de água atingido pelo dispositivo após o desligamento do conjunto motobomba. Em relação às incertezas experimentais, ressalta-se que o modelo foi confrontado experimentalmente de forma estrita quanto ao comportamento do rebaixamento do nível de água na estrutura do TAEB ao longo do tempo, e não quanto a sua capacidade de atenuar diretamente as pressões transientes ao longo da extensão da adutora. A ausência de medições de pressão por meio de transdutores instalados ao longo da adutora impõe algumas limitações na validação direta dessa variável. Entretanto, a abordagem adotada neste trabalho fundamenta-se no fato de a oscilação do nível de água no TAEB atuar de forma indireta na atenuação de pressões, justificada pela equação da continuidade, uma vez que a entrada ou a saída de água na estrutura do TAEB, governada pela expulsão ou admissão de ar na Ventosa, impacta a quantidade de massa existente na adutora e, conseqüentemente, permite a atenuação das pressões positivas e negativas pelo mesmo princípio adotado no funcionamento da Chaminé de Equilíbrio. Assim, embora as pressões calculadas nos demais pontos da adutora foram obtidas de forma numérica pelo MOC, a concordância dos resultados modelados com os dados medidos no experimento assegura a validação a partir do balanço de massa entre a adutora e o TAEB. Portanto, ao utilizar a variação do nível de água durante a resposta do TAEB ao transiente gerado pelo desligamento da bomba, obtém-se uma validação do modelo numérico de forma indireta, mas hidraulicamente consistente. Conforme já mencionado, o nível da água foi medido por meio de trena de fita, cuja precisão é da ordem de 0,5 a 1 mm, o que pode causar um erro

de medida em escala milimétrica, mas isso foi considerado irrisório em relação à dimensão da adutora e do TAEB.

Com esse dado medido, foi realizada a validação do modelo computacional implementado no UFC 7, de modo a se aproximar o máximo possível do resultado obtido em campo. Para isso, foram testadas algumas variáveis envolvidas no modelo. Conforme ilustrado no Capítulo 4, foi possível realizar a validação e foi obtido um resultado bastante próximo no UFC 7, o que viabilizou a utilização do TAEB em outras adutoras com configurações distintas, para também verificar o comportamento do dispositivo.

Além disso, o dispositivo pode ser utilizado em diversos pontos, na quantidade que o usuário assim desejar, além de poder ser adotado em conjunto com outros dispositivos de proteção contra o golpe de aríete já implementados no UFC 7. Isso é garantido pela capacidade da linguagem Java de orientação a objetos e distribuição de funções dentro do programa. Este trabalho se restringiu à instalação de apenas um TAEB isoladamente, com o objetivo de avaliar o efeito do dispositivo ao longo das adutoras simuladas.

Neste trabalho, procurou-se instalar o TAEB em pontos de pressões negativas de toda a adutora, de tal forma a perceber o seu efeito de atenuação nas subpressões. Assim, caso o TAEB fosse instalado em pontos onde não há pressão negativa, ele não teria o seu principal efeito de elevação de subpressões e combate à cavitação. Ademais, o efeito de elevação da envoltória é perpetuado ao longo da adutora, em especial a jusante do dispositivo. Após encontrar o reservatório, a onda de pressão é refletida e o efeito do TAEB também ocorre nas sobrepressões.

Como medidas de otimização da utilização do TAEB, recomenda-se priorizar a adoção do diâmetro da sua estrutura com, no mínimo, o mesmo da adutora onde ele será instalado. A adoção do comprimento da sua estrutura depende dos resultados obtidos a partir das simulações. Este deve ser o suficiente para que os resultados de rebaixamento de nível de água não sejam negativos, pois isso geraria uma situação fisicamente impossível. Em relação à Ventosa, deve-se considerar aquela que, ao aumentar o seu diâmetro, não haja mais modificações nos resultados da oscilação do nível de água no TAEB. Assim, para a escolha do comprimento e diâmetro do TAEB e do diâmetro da Ventosa, há uma dependência de simulações que devem ser analisadas caso a caso.

Por fim, foram realizadas simulações considerando apenas as Ventosas no mesmo nó onde foram testados os TAEB's. Os resultados indicaram que, nas condições simuladas, o TAEB proporcionou maior estabilidade nos picos de pressão durante o tempo de simulação, além de apresentar, em alguns casos, um efeito mais abrangente em relação ao longo da adutora

em comparação com a atuação pontual da Ventosa. Também foram realizadas comparações do dispositivo com a Chaminé de Equilíbrio, o que permitiu demonstrar que o TAEB apresenta um comportamento semelhante e algumas vezes até melhor quando comparado a esse dispositivo.

Entende-se, então, que o TAEB foi modelado para cumprir a função para o qual foi proposto, ou seja, a redução das pressões negativas no ponto onde será instalado. Entretanto, faz-se fundamental para projetistas de sistemas de distribuição de água, quando optarem pela sua utilização, que seja realizada a simulação do dispositivo em softwares como o UFC 7, pois somente assim será possível verificar o melhor local no qual ele deve ser instalado, além de permitir realizar vários testes com os dados de entrada do dispositivo. Ao realizar esse procedimento, será possível instalar um dispositivo eficiente e econômico, uma vez que ele cumpre funções semelhantes a dispositivos como a Chaminé de Equilíbrio e o TAU, mas apresenta um custo de instalação menos oneroso.

Como principais limitações metodológicas deste trabalho, destacam-se as simplificações adotadas no modelo do MOC, ou seja, os resultados obtidos com o TAEB podem subestimar as pressões no caso de transientes muito rápidos e/ou podem se tornar instáveis quando há geometrias complexas envolvidas. Pode-se ressaltar também que o modelo da Ventosa, adotado no TAEB, pode não representar adequadamente a incorporação de ar na adutora, caso as bolhas de ar sejam arrastadas ao longo da tubulação. Por fim, o modelo da Chaminé de Equilíbrio também pode não representar fielmente os resultados obtidos se o atrito das paredes e/ou a inércia da coluna líquida no interior do TAEB forem significativos.

Como principais contribuições advindas da realização deste trabalho, citam-se o desenvolvimento e a validação do modelo numérico de um novo dispositivo para o combate aos transientes, denominado Tubo de Admissão e Expulsão Bidirecional. A utilização do TAEB se justifica para adutoras de pequeno e médio portes, devido a menores valores de vazão, desnível geométrico, comprimento e diâmetro das tubulações e custos com implantação do dispositivo. Conforme observado nos resultados obtidos neste trabalho, o principal efeito do TAEB é a atenuação das subpressões. Assim, de forma comparativa, o TAEB é uma alternativa de baixo custo à instalação de Tanques de Alimentação Unidirecional (TAU's) em adutoras de distribuição de água de pequeno e médio portes. Para adutoras de portes maiores, o TAEB pode não ter o mesmo efeito e, nesse caso, o dispositivo mais indicado é a Chaminé de Equilíbrio. No entanto, no âmbito deste trabalho, não foi verificada a eficiência do TAEB para esse tipo de sistema hidráulico. Acrescenta-se que, conforme exposto nos resultados, para que a Chaminé de Equilíbrio fosse mais efetiva que o TAEB na atenuação do transiente, ela necessitou de

grandes dimensões, o que pode dificultar bastante a sua implantação em termos de orçamento e disponibilidade de espaço físico.

5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

Este trabalho foi desenvolvido e, durante a sua elaboração, foi possível verificar as seguintes sugestões para posteriores investigações e/ou ampliações:

- **Ampliação dos Experimentos:** Realizar simulações utilizando o TAEB em outras configurações de adutoras, variando-se vazão, desnível geométrico e diâmetros. Também se propõe a coleta de outros dados em campo, como medições de pressão e vazão, de tal forma a complementar a análise de sensibilidade do modelo;
- **Análise Comparativa de Desempenho:** Realizar simulações comparativas entre o TAEB e os dispositivos convencionais de proteção, como Reservatórios Hidropneumáticos e Tanques de Alimentação Unidirecional, visando estabelecer critérios de custo-benefício e eficiência na atenuação do golpe de aríete;
- **Otimização de Sistemas Compostos:** Investigar o comportamento dinâmico de adutoras utilizando a instalação combinada de múltiplos TAEB's em pontos diversos ou em conjunto com outros dispositivos, com foco na proteção de perfis geométricos complexos onde a subpressão é severa em diversos pontos. Também investigar o comportamento do TAEB em sistemas hidráulicos de grande porte;
- **Refinamento via Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD):** Desenvolver modelos tridimensionais utilizando CFD (*Computational Fluid Dynamics*) para analisar o escoamento bifásico (ar-água) e as perdas de carga localizadas na conexão entre a adutora e o TAEB, permitindo uma compreensão mais detalhada da turbulência e do amortecimento viscoso interno ao dispositivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELDAYEM, O. M.; FERRÀS, D.; VAN DER ZWAN, S.; KENNEDY, M. Analysis of unsteady friction models used in engineering software for water hammer analysis: Implementation case in Wanda. **Water (Switzerland)**, v. 13, n. 4, 2021. MDPI AG.

ABDULAMEER, Layth; AL-DUJAILI, Ahmed N.; AL-KAFAJI, Mahmoud Saleh; MAIMURI, Najah M.L. Al; SHEMAL, Khalid. Impact of outlets manifold configuration on hydraulic stability and water hammer in pumping stations. **Results In Engineering**, [S.L.], v. 26, p. 104747, jun. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104747>.

AZEVEDO NETTO, José Martiniano de. **Manual de Hidráulica**. São Paulo: Edgar Blucher Ltda, 2015.

AÇO, Val. **Válvulas Tipo Retenção**. [s.d.]. Disponível em: https://www.valaco.com.br/inf_tecnicas/tipo_retencao.html. Acesso em: 05 ago. 2025.

ALMEIDA, A. B.; KOELLE, E., 1992, Fluid Transients in Pipe Networks, **Computational Mechanics Publications**, Southampton Boston (Co-published with) Elsevier Applied Science, London, New York, NY.

AWWA. **Air-Release, Air/Vacuum, and Combination Air Valves**. 1. ed. Denver, United States of America: American Water Works Association, 2001. 1–38 p. ISBN 1-58321-152-7.

BARBOSA, Marcus Paulo Rosa. **Modelagem Computacional de Chaminés de Equilíbrio e Tanques de Alimentação Unidirecional como Dispositivos Atenuadores do Golpe de Ariete em Adutoras**. 2006. 171 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

BARBOSA, João Marcelo Costa. **Modelagem Computacional de Transientes Hidráulicos em Ventosas de Tríplex Função e Non Slam considerando as Curvas de Admissão e Expulsão de Ar**. 2015. 116 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

BERGANT, A.; SIMPSON, A. R. **PIPELINE COLUMN SEPARATION FLOW REGIMES**. 1999.

BERGANT, A.; SIMPSON, A. R.; VÍTKOVSKÝ, J. Developments in unsteady pipe flow friction modelling. **Journal of Hydraulic Research**, v. 39, n. 3, p. 249–257, 2001. International Association of Hydraulic Engineering Research.

BERGANT, A.; SIMPSON, A. R.; TIJSSELING, A. S. Water hammer with column separation: A historical review. **Journal of Fluids and Structures**, v. 22, n. 2, p. 135–171, 2006. Academic Press.

BRUNONE, B.; GRECO, M. UN MODELLO PER LA RICOSTRUZIONE DI FENOMENI DI COLPO D' ARIETE ANCHE IN PRESENZA DI CAVITAZIONE - **RISCONTRO SPERIMENTALE**, 1990.

C. K. Su, and C. Camara, “Cavitation luminescence in a water hammer: Upscaling sonoluminescence,” **Journal of Physics of Fluids**, vol. 15, pp. 1457- 1461, 2003.

CAMPBELL, A. 1983. The effect of air valves on surge in pipelines. **Proceedings of the 4th International Conference on Pressure Surges**, Bath UK, 89-102.

CARLOS, M. *et al.* Understanding Air Release through Air Valves. **Journal Of Hydraulic Engineering**, [S.L.], v. 137, n. 4, p. 461-469, abr. 2011. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0000324](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000324).

CARVALHO, Henrique Feitosa de. **ANÁLISE DE CUSTO-BENEFÍCIO DA IMPLANTAÇÃO DE DISPOSITIVOS ATENUADORES DO GOLPE DE ARIETE EM ADUTORAS**. 2020. 77 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Christus, Fortaleza, 2020.

CEARÁ. Secretaria dos Recursos Hídricos (SRH). **Módulo VI - Projeto Executivo da Adutora de Antonina do Norte: Volume III - Detalhamento do Projeto Executivo: Tomo 2 - Memória de Cálculo**. SRH, out. 2006. 112 p.

CHAIKO, M. A. et al. Models for analysis of water hammer in piping with entrapped air. **Journal of Fluids Engineering**, v. 124, n. March 2002, p. 194–204, 2001. ISSN 00982202.

CHAUDHRY, M. H. **Applied Hydraulic Transients**. Third. Columbia, SC, USA: Van Nostrand Reinhold Ltd., 2014. 487 p. ISBN 9781461485377.

CHOON, Tan Wee *et al.* Investigation of Water Hammer Effect Through Pipeline System. **International Journal On Advanced Science, Engineering And Information Technology**, [S.L.], v. 2, n. 3, p. 246, 2012. Insight Society. <http://dx.doi.org/10.18517/ijaseit.2.3.196>.

DAUDE, F.; TIJSSELING, A. J.; GALON, P. Numerical investigations of water-hammer with column-separation induced by vaporous cavitation using a one-dimensional Finite-Volume approach. **Journal of Fluids and Structures**. v. 83, p. 91-118, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2018.08.014>.

DE VRIES, A. H., 1973, “**Cavitation Door Waterslag in Horizontale Leidingen met Enige Hoge Punten (Cavitation Due to Waterhammer in Horizontal Pipelines with Several High Points)**”, Report M 1152, Delft Hydraulics Laboratory, Delft, The Netherlands (in Dutch).

DINH TAM, N. **FLUID TRANSIENTS IN COMPLEX SYSTEMSWITH AIR ENTRAINMENT**. 2009.

DUAN, Huan-Feng; PAN, Bin; WANG, Manli; CHEN, Lu; ZHENG, Feifei; ZHANG, Ying. State-of-the-art review on the transient flow modeling and utilization for urban water supply system (UWSS) management. **Journal Of Water Supply: Research and Technology-Aqua**, [S.L.], v. 69, n. 8, p. 858-893, 22 out. 2020. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/aqua.2020.048>.

EL-KHATIB, A. R.; ABDEL-NABY, A. A.; HAMMOUD, A. H. The Effect of Suction Pipe Length and Diameter on the Effectiveness of Flywheel as a Transient Control Device. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF FLUID DYNAMICS, 12., 2016, Cairo. **Proceedings [...]**. Cairo: ICFD, 2016. p. 1-6.

FENASAN, 2017, São Paulo. **RESERVATÓRIOS HIDROPNEUMÁTICOS PARA A PROTEÇÃO DE ADUTORAS POR RECALQUE EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA: ESTUDO DE DOIS CASOS**. São Paulo: Abes, 2017.

FERREIRA, Fábio Eduardo Franco Rodrigues. **Modelagem Computacional de Efeitos Dinâmicos de Dissipação de Energia em Transientes Hidráulicos**. 2011. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

FUERTES, V.S. 2001. **Hydraulic transients with entrapped air pockets**. PhD Thesis, Department of Hydraulic Engineering, Polytechnic University of Valencia, Spain.

FUERTES, V.S.; IGLESIAS, P.L.; LOPEZ, P.A.; MORA, D. 2009. Air valves sizing and hydraulic transients in pipes due to air release flow. **Proceedings of the 33rd IAHR Congress**, Vancouver, 247-254.

FUERTES-MIQUEL, VS.; LÓPEZ JIMÉNEZ, PA.; MARTÍNEZ-SOLANO, FJ.; LÓPEZ-PATÍÑO, G. (2016). Numerical modelling of pipelines with air pockets and air valves. **Canadian Journal of Civil Engineering**. 43(12):1052-1061. doi:10.1139/cjce-2016-0209.

FUERTES-MIQUEL, V. S.; CORONADO-HERNÁNDEZ, O. E.; IGLESIAS-REY, P. L.; MORA-MELIÁ, D. Transient phenomena during the emptying process of a single pipe with water–air interaction. **Journal of Hydraulic Research**, v. 57, n. 3, p. 318–326, 2019. Taylor and Francis Ltd.

FUERTES-MIQUEL, V. S.; CORONADO-HERNÁNDEZ, O. E.; MORA-MELIÁ, D.; IGLESIAS-REY, P. L. Hydraulic modeling during filling and emptying processes in pressurized pipelines: a literature review. **Urban Water Journal**, 21. abr. 2019. Taylor and Francis Ltd.

FUNK, J.E.; WOOD, D.J.; REDDY, L.S.; DENGGER, D.C. 1992. Pressure surges due to rapid expulsion of air. **Proceedings of the International Conference on Unsteady Flow and Fluid Transients**, Durham UK, 313-319.

GARCIA-TODOLÍ, S.; IGLESIAS-REY, P. L.; MORA-MELIA, D.; MARTINEZ-SOLANO, F. J.; FUERTES-MIQUEL, V. S. (2018). Computational determination of air valves capacity using CFD techniques. **Water**, 10(10), 16. <https://doi.org/10.3390/w10101433>.

JENSEN, R. K. **Modelling of a Two-Phase Water Hammer**, 2018. Aalborg University Esbjerg.

JÚNIOR, F. P. Dissertação, **Modelagem computacional de ventosas de duplo efeito como mecanismo de alívio do golpe de aríete**. Fortaleza - Ce: [s.n.], 2007. 152 p.

KANDIL, M.; KAMAL, A.M.; EL-SAYED, T.A.. Effect of pipematerials on water hammer. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, Cairo, v. 179, n. 103996, p. 1-8, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpvp.2019.103996>.

KESSAL, M.; AMAOUCHE, M. Numerical simulation of transient vaporous and gaseous cavitation in pipelines. **International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow**, v. 11, n. 2, p. 121–137, 2001.

LAHC. **Manual: Sistema de Abastecimento de Água – Simulação e Dimensionamento de Redes de Água e Adutoras com os Módulos UFC 2, UFC 3, UFC 4, UFC 5 e UFC 7**. Fortaleza. [s.d.].

LAHC. **Manual UFC 8: Interface entre AutoCAD e SWMM**. Fortaleza. [s.d.].

LAHC. **Manual UFC 9**. Fortaleza. [s.d.].

LAHC. **Manual do Usuário: UFC 11**. Fortaleza. [s.d.].

LAHC. **Manual UFC-FLOW**. Fortaleza. [s.d.].

LAUCLAN, C. S.; ESCARAMEIA, M.; MAY, R. W. P.; BURROWS, R.; GAHAN, C. (2005). “Air in pipelines: A literature review.” **Rep. SR 649**, HR Wallingford.

LEE, S.; LOW, H. T.; NGUYEN, T.; RONG, W.; NEO, A. **Experimental Study of Check Valves in Pumping Systems with Air Entrainment**. 2008.

LESSA, R. C. **Transientes Hidráulicos em Sistemas Complexos de Adução de Água**. Dissertação de Mestrado. EESC/USP, 1984.

LEOW, L.C.; LEE, T.S. 1998. Effects of air valve on pressure surges during pumping trip in pumping station. **Proceedings of the XIX IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Cavitation**, Singapur, 556-563.

LIU, J. Numerical properties of the discrete gas cavity model for transients. **J. Fluids Eng**, v. 122, p. 636–639, 2000.

MAHANNA; LOEB; MAGALHAES. **Water Hammer and Surge Tanks**. [s.l.]: Cive 401, 19 nov. 2014. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Water-Hammer-and-Surge-Tanks-McQueen/a0bb7450fcc301324a439359b11ef6481c7f9ea7>. Acesso em: 12 abr. 2026.

MALEKPOUR, A.; KARNEY, B. W. Profile-Induced Column Separation and Rejoining during Rapid Pipeline Filling. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 140, n. 11, 2014. American Society of Civil Engineers (ASCE).

MARTIN, C. S., 1983, **Representation of Pump Characteristics for Transient Analysis**, Proc. Symp. on Performance Characteristics of Hydraulic Turbines and Pumps, Amer. Soc. Mech. Engrs., Nov.

MARTINS, N. M.; CARRIÇO, N. J. G.; RAMOS, H. M.; COVAS, D. I. C.. Velocity-istribution in pressurized pipe flow using CFD: Accuracy and mesh analysis. **Computers & Fluids**, v. 105, p. 218-230, 2014.

MENDES, Luís Filipe Martins. **Métodos Clássicos de Protecção de Sistemas Elevatórios Contra o Golpe de Aríete**. 2011. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.

MEU COMPRESSOR. Reservatório Vertical Ar Comprimido Schulz SCS 2000 9,65 Bar. Disponível em: <https://www.meucompressor.com.br/tratamento-de-ar/reservatorio-vertical/reservatorio-vertical-ar-comprimido-schulz-scs-2000-9-65-bar?parceiro=2246>. Acesso em: 18 jul. 2026.

MOGHADDAM, M. Azhdary. Analysis and design of a simple surge tank. **IJE Transactions A: Basics**, Zahedan, v. 17, n. 4, p. 339-345, dez. 2003.

NETO, Vicente de Castro Sanders. **Modelagem Computacional do Transitório Hidráulico de Redes de Distribuição de Água Utilizando o Método Lagrangeano das Ondas Características**. 2019. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

OLIVEIRA, Bruno Alexandre de. **Conhecendo os componentes de uma usina hidrelétrica** [livro eletrônico]. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. e-PUB.

PAIVA, Bruno Araújo. **Proposição de um Novo Modelo para a Simulação Computacional da Cavitação Resultante do Golpe de Aríete em Adutoras**. 2019. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

PAIVA, Bruno Araújo. **Proposição de Equações para Estimativa da Fração de Vazios Inicial e do Coeficiente de Amortecimento através da Elaboração do Método da Cavitação com Vazios e Amortecimento de Onda**. 2023. 187 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

PEARSALL, I. S. **THE VELOCITY OF WATER HAMMER WAVES**. 1965.

POZOS, O.; GIESECKE, J.; MARX, W.; RODAL, E.A.; SANCHEZ, A. 2010. Experimental investigation of air pockets in pumping pipelines systems. **Journal of Hydraulic Research**, 48(2): 269-273. doi:10.1080/00221681003726262.

PROVOOST, G. A. Investigation into cavitation in a prototype pipeline caused by water hammer. **NASA STI/Recon Technical Report N**, v. 78, 1976.

PROVOOST, G. A.; WYLIE, E. Discrete gas model to represent distributed free gas in liquids. **Presented at 5th Intern. Symp. on Water Column Separation**, p. 28–30, 1982.

RODRIGUES, C. **Artigos Referenciais teóricos sobre o uso de e-book em bibliotecas públicas brasileiras**. 2014.

SAEMI, S.; RAISEE, M.; CERVANTES, M. J.; NOURBAKHSH, A.. Computation of two- and three-dimensional water hammer flows. **Journal of Hydraulic Research**, v. 57, n. 3, p. 386-404, 2019.

SANESUL. **Em Dourados, Sanesul instala TAUS de proteção da rede de água**. 2021. Disponível em: <https://www.sanesul.ms.gov.br/noticias/em-dourados-sanesul-instala-taus-de-protecao-da-rede-de-agua-6015>. Acesso em: 05 ago. 2025.

SCPOLIAS. **Volantes de inércia**. 1 figura. Disponível em: <https://www.scpolias.com.br/>. Acesso em: 12 ago. 2025.

SHU, J. J. Modelling vaporous cavitation on fluid transients. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 80, n. 3, p. 187–195, 2003b. Elsevier.

SOARES, A. K.; COVAS, D. I. C.; RAMOS, H. M.; FERNANDA, L.; REIS, R. **Unsteady Flow with Cavitation in Viscoelastic Pipes**. 2009.

SOARES, A. K.; MARTINS, N.; COVAS, D. I. C. Investigation of transient vaporous cavitation: Experimental and numerical analyses. *Procedia Engineering*. **Anais...** . v. 119, p.235–242, 2015. Elsevier Ltd.

SRADOMSKI, Waldemar; NYCZ, Aneta; SKOWROŃSKI, Marek. Modelling Water Hammer Effects in Rising Pipeline Systems Using the PKP Method and the MOC. **Energies**, [S.L.], v. 18, n. 18, p. 5005, 20 set. 2025. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en18185005>.

STEPANOFF, A. J., 1957, **Centrifugal and Axial Flow Pumps**, John Wiley & Sons, New York, NY.

STEPHENSON, D, 1989, Pipeline Design for Water Engineers, **Elsevier**, Third Edition, Amsterdam.

TEIXEIRA, Lucas Florêncio da Cunha. **Efeito da Entrada da Tubulação por Cima do Reservatório de Jusante nos Transientes Hidráulicos**. 2021. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

TEIXEIRA, Lucas Florêncio da Cunha; SANDERS NETO, Vicente de Castro; PAIVA, Bruno Araújo; BARBOSA, João Marcelo Costa; CASTRO, Marco Aurélio Holanda de. Efeito da entrada superior em reservatórios de jusante durante transitório hidráulico em adutoras de distribuição de água. **Revista DAE**, v. 70, p. 6-18, 2022.

TEIXEIRA, Lucas Florêncio da Cunha; SILVEIRA NETO, José Paulo da; SANDERS NETO, Vicente de Castro; PAIVA, Bruno Araújo; BARBOSA, João Marcelo Costa; CASTRO, Marco Aurelio Holanda de. Pré-dimensionamento de válvulas de alívio a partir do cálculo de volume expulso de água durante transitório hidráulico. **Revista DAE**, [S.L.], v. 71, n. 241, p. 224-233, 26 jun. 2023. *Revista DAE*. <http://dx.doi.org/10.36659/dae.2023.050>.

TIJSSELING, A. S.; VARDY, A. E.; FAN, D. **FLUID-STRUCTURE INTERACTION AND CAVITATION IN A SINGLE-ELBOWPIPE SYSTEM**. 1996.

TSUTIYA, Milton T. **Abastecimento de Água**. São Paulo, Escola Politécnica da USP. 3ª Edição, 2006.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. EPANET 2.0 – Build 2.00.12: Water Supply and Water Resources Division. Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory, 2000. Versão em português: **Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento – LENHS/UFPB**, João Pessoa, 26 set. 2011. Disponível em: <http://www.lenhs.ct.ufpb.br>. Acesso em: 13 abr. 2025.

VÍTKOVSKÝ, J.P.; MARTIN, L.; SIMPSON, A.; BERGANT, A. (2000). **Advances in unsteady friction modelling in transient pipe flow**. The 8th International Conference on Pressure Surges, BHR, The Hague, The Netherlands, 12-14 April, 2000.

WOOD, D. J.; LINGIREDDY, S.; BOULOS, P. F.; KARNEY, B. W.; MCPHERSON, D. L. Numerical methods for modeling transient flow in distribution systems. **Journal / American Water Works Association**, 2005. American Water Works Association.

WYLIE, E. B.; STREETER, V. L.; SUO, L. **Fluid Transient in Systems**. New Jersey: Prentice Hall. 1993.

ZHOU, F.; HICKS, F.E.; STEFFLER, P.M. 2002. Transient flow in a rapidly filling horizontal pipe containing trapped air. **Journal of Hydraulic Engineering**, 128(6): 625-634. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:6(625).

ANEXO A – REGISTRO FOTOGRÁFICO DA CONSTRUÇÃO DA ADUTORA DA FAZENDA SANTA MARIA COM A INSTALAÇÃO DO TAEB

Figura 105 – Posicionamento do conjunto motobomba da adutora



Fonte: Márcio Luiz de Carvalho (2023).

Figura 106 – Saída da adutora após a captação no manancial



Fonte: Márcio Luiz de Carvalho (2023).

Figura 107 – Construção da derivação onde foi instalado o TAEB



Fonte: Márcio Luiz de Carvalho (2023).

Figura 108 – Posicionamento do bloco de ancoragem do TAEB



Fonte: Márcio Luiz de Carvalho (2023).

Figura 109 – Posicionamento do TAEB



Fonte: Márcio Luiz de Carvalho (2023).

Figura 110 – Disposição final do TAEB, após o reaterro das valas e instalação do tubo de acrílico



Fonte: Márcio Luiz de Carvalho (2023).

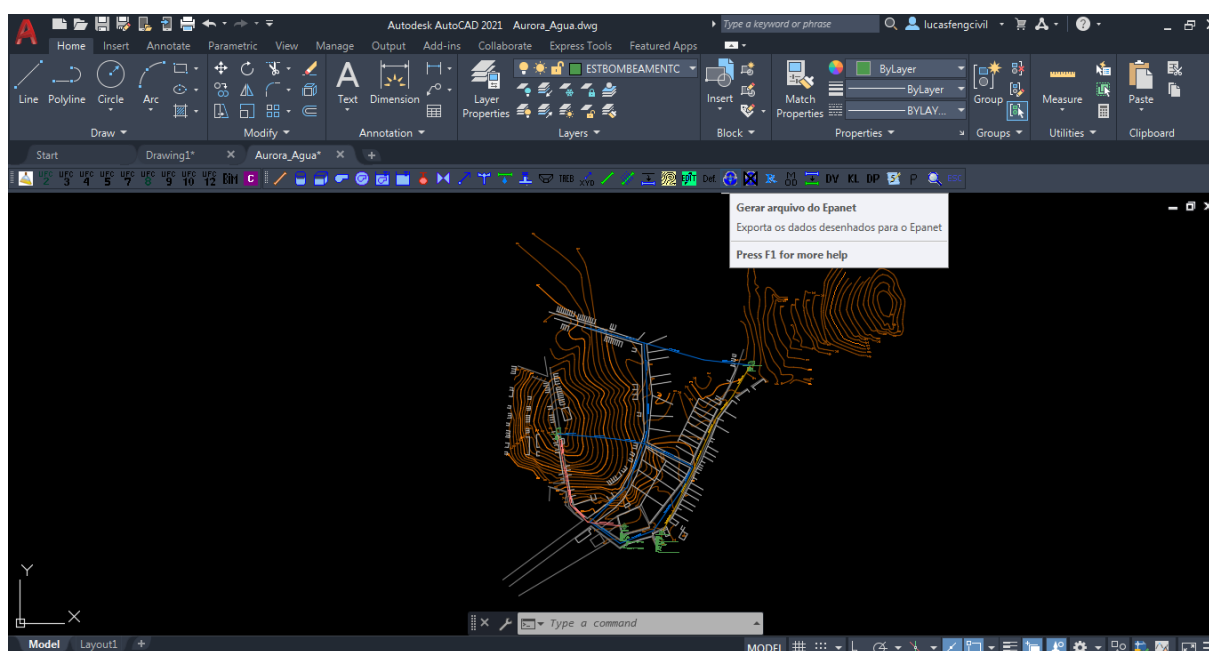
APÊNDICE A – INTERFACE DO UFC 7 COM O USUÁRIO COM A INSERÇÃO DO TAEB

Para demonstrar a utilização do UFC 7, também contemplando a instalação do TAEB em algum nó do sistema hidráulico, a seguir encontra-se um tutorial referente ao exemplo da Adutora de Aurora/CE, desenvolvido durante a geração dos resultados deste trabalho.

O primeiro passo para o cálculo do transiente hidráulico pelo UFC 7 é a criação dos arquivos da adutora ou da rede. Conforme já explicitado neste trabalho, há duas formas atualmente de realizar essa etapa: por meio do arquivo .pth ou por meio dos arquivos .inp, .rpt e .pro. Os exemplos desenvolvidos neste trabalho foram realizados pela segunda forma, então esta é a que será ilustrada nas Figuras seguintes.

O arquivo .inp é gerado pelo UFC 2, dentro da interface do AutoCAD. Caso ainda não haja o arquivo em AutoCAD, será necessário criá-lo e atribuir curvas de nível com as elevações do terreno (que podem ser obtidas por levantamento topográfico ou por ferramentas de geoprocessamento). Já havendo o arquivo em AutoCAD, o usuário poderá realizar o procedimento ilustrado na Figura 111, que traz a ferramenta do UFC 2 responsável pela exportação da adutora ou da rede para o EPANET.

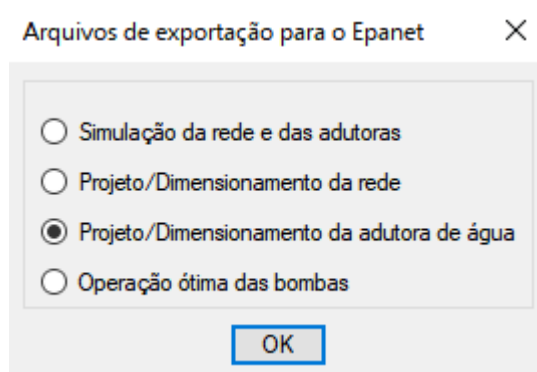
Figura 111 – Criação do arquivo .inp no UFC 2



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Na janela seguinte, deve-se escolher o tipo de sistema: rede, adutora ou ambos. Para esse exemplo, deve-se selecionar adutora, conforme exibido na Figura 112.

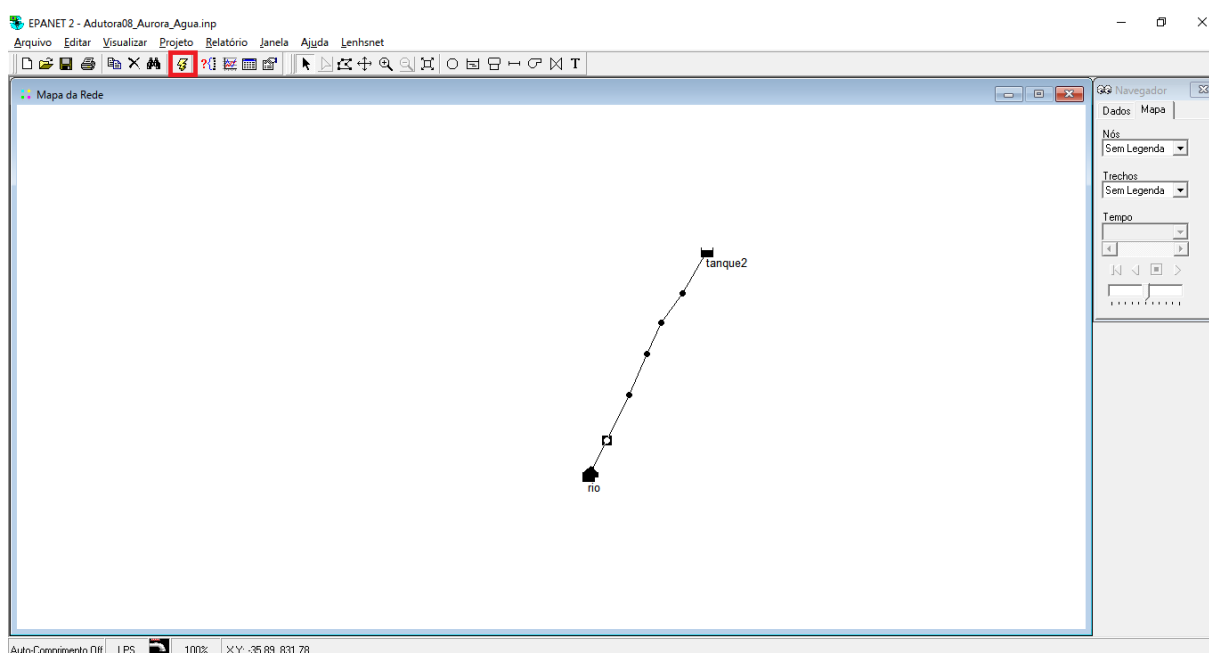
Figura 112 – Seleção do tipo de sistema hidráulico no UFC 2



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

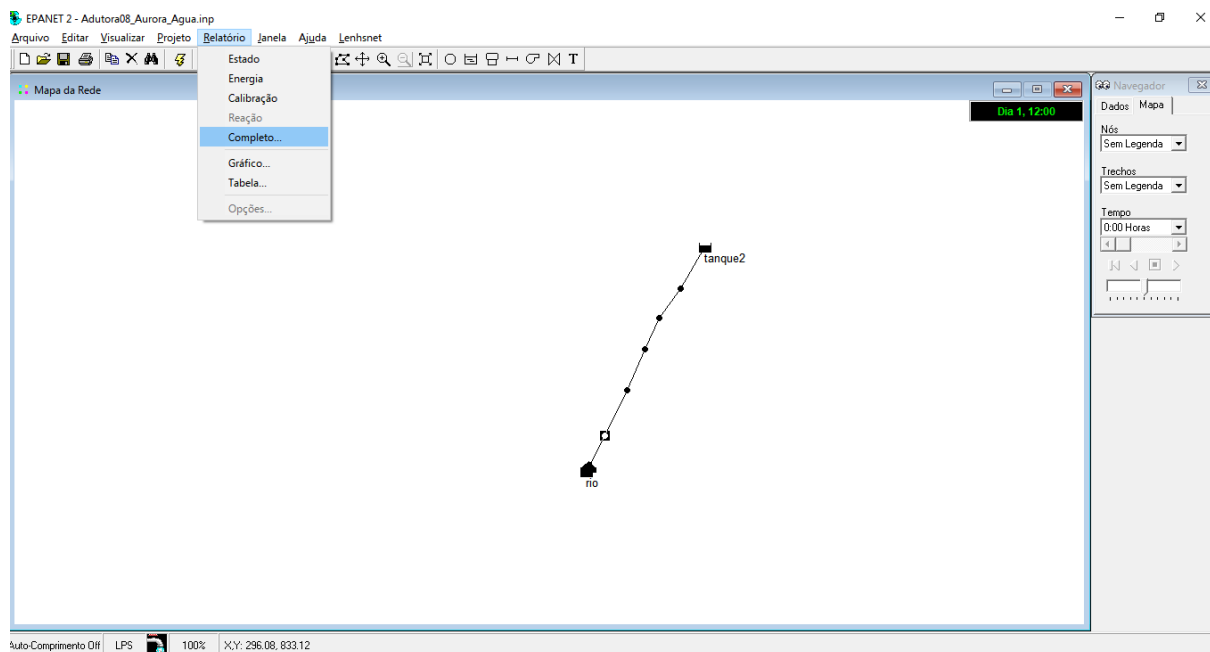
Em seguida, será aberta a janela do EPANET, como observado na Figura 113. Nessa janela, deve-se executar a simulação e depois exportar o relatório completo, como ilustrado na Figura 114. O relatório completo é o arquivo .rpt que o EPANET gera para que o UFC 7 consiga obter os dados do regime permanente. O arquivo .rpt deve ser salvo na mesma pasta onde está o arquivo .inp.

Figura 113 – Simulação do EPANET



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

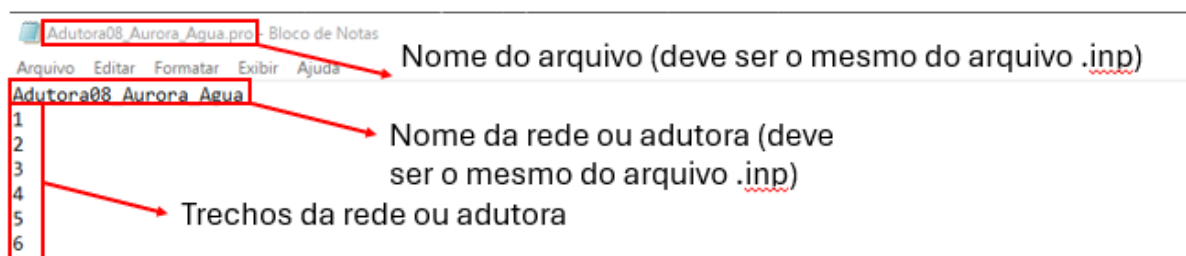
Figura 114 – Geração do relatório completo após a simulação do EPANET



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O próximo passo é a criação do arquivo .pro, que pode ser feito no Bloco de Notas do Windows. Esse arquivo contém os trechos que o UFC 7 utilizará para mostrar os resultados da simulação do transiente. Os trechos da rede ou da adutora são os mesmos presentes no arquivo .inp; portanto, para selecionar os trechos, estes devem ser visualizados no EPANET. O arquivo .pro apresenta o aspecto demonstrado na Figura 115. O arquivo .pro deve ser colocado na mesma pasta dos arquivos .inp e .rpt.

Figura 115 – Aspecto típico do arquivo .pro

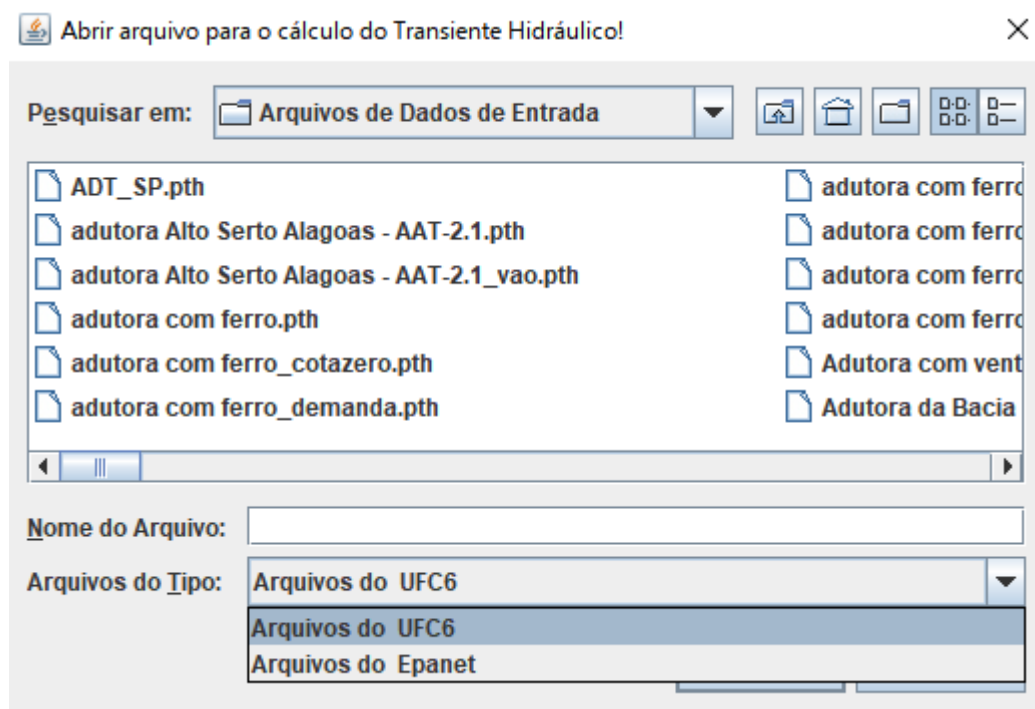


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Em seguida, o arquivo já poderá ser aberto no UFC 7. Para isso, deve-se abrir o programa executável do UFC 7 (presente na pasta onde o Sistema UFC foi instalado) e procurar pelo arquivo .inp criado. Deve-se alterar a opção padrão do UFC 7 para “Arquivos do Epanet”,

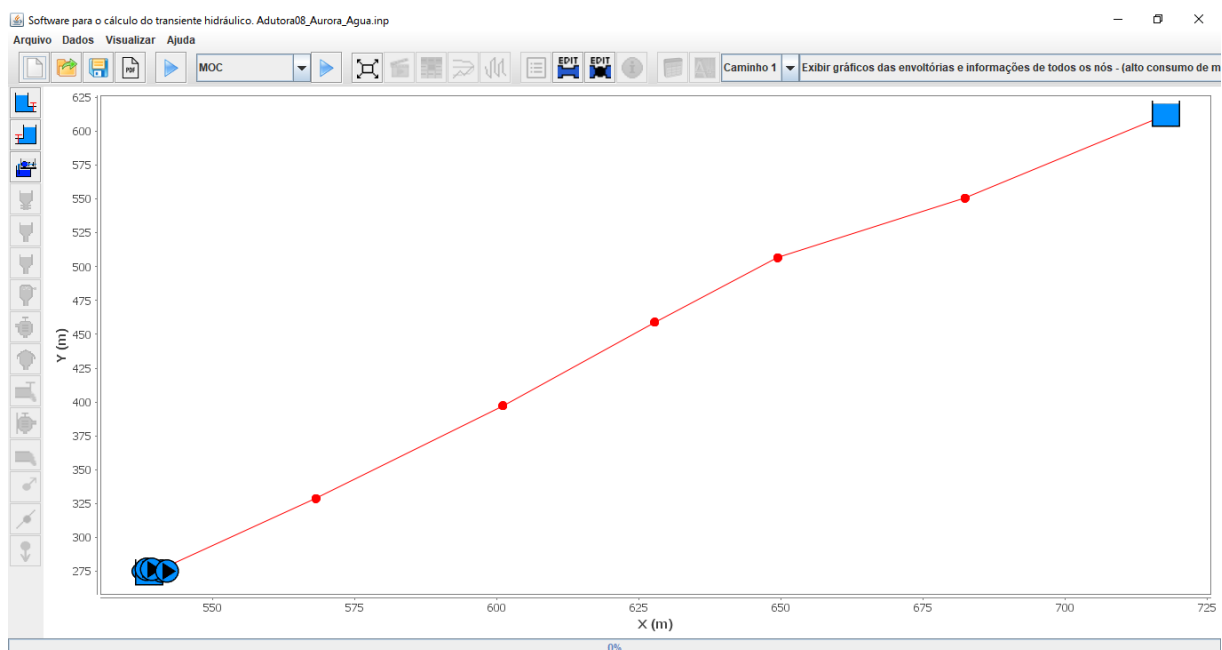
conforme o procedimento exibido na Figura 116. Após a abertura do arquivo no UFC 7, a janela exibida será a Figura 117.

Figura 116 – Modificação do tipo de arquivo a ser aberto no UFC 7



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

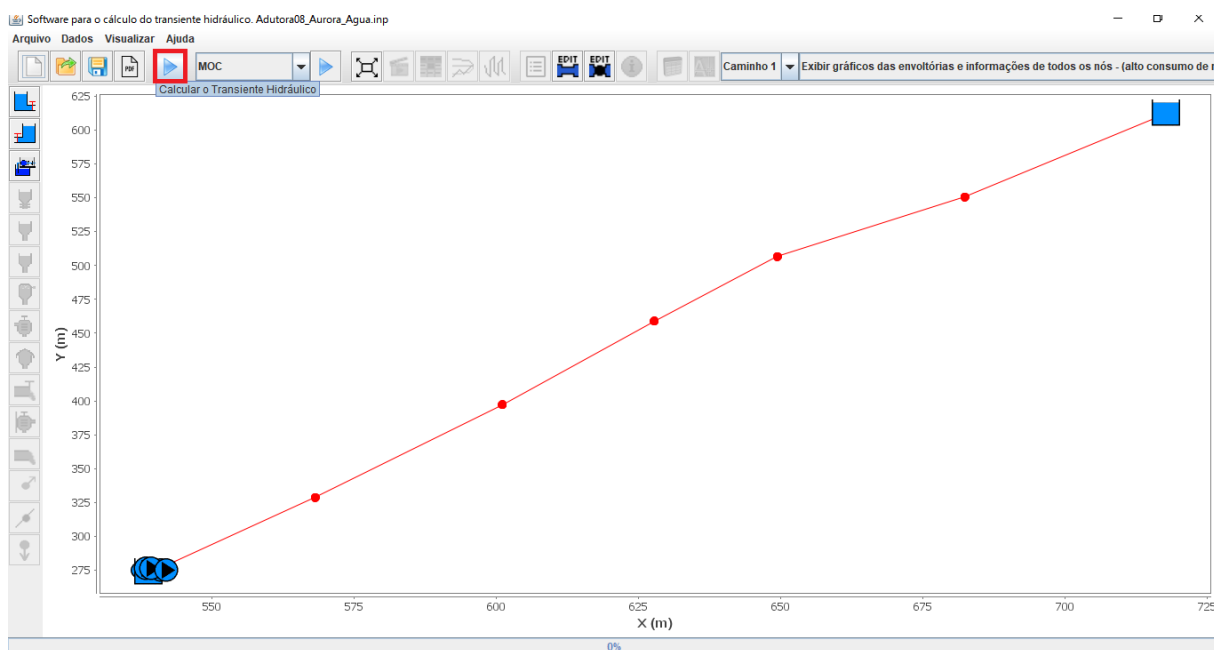
Figura 117 – Arquivo da adutora aberto no UFC 7



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para a simulação da adutora com o TAEB, primeiramente ela deve ser simulada sem nenhum dispositivo, pois o TAEB utiliza algumas variáveis do regime transiente para executar suas rotinas. Para realizar a simulação, deve-se clicar na opção “Calcular o Transiente Hidráulico”, conforme ilustrado na Figura 118.

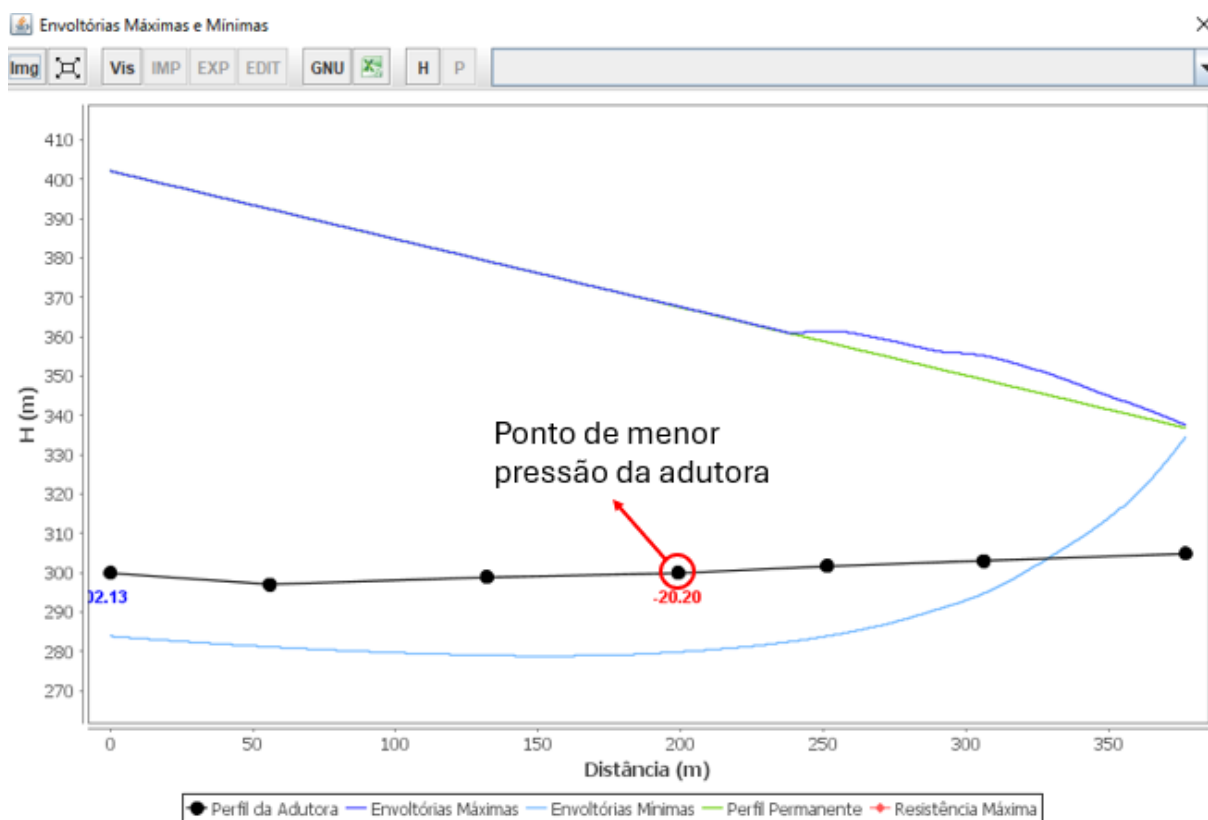
Figura 118 – Simulação da adutora sem dispositivos



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Após a simulação, o UFC 7 irá exibir as envoltórias de pressões máximas e mínimas da adutora. Com isso, já é possível a inserção do TAEB. Conforme já explicitado, é fundamental posicionar o TAEB em pontos de pressão negativa e, nesse trabalho, procurou-se posicioná-lo no ponto de menor subpressão. Isso pode ser verificado pelas envoltórias geradas nessa primeira simulação, que corresponde à Figura 119.

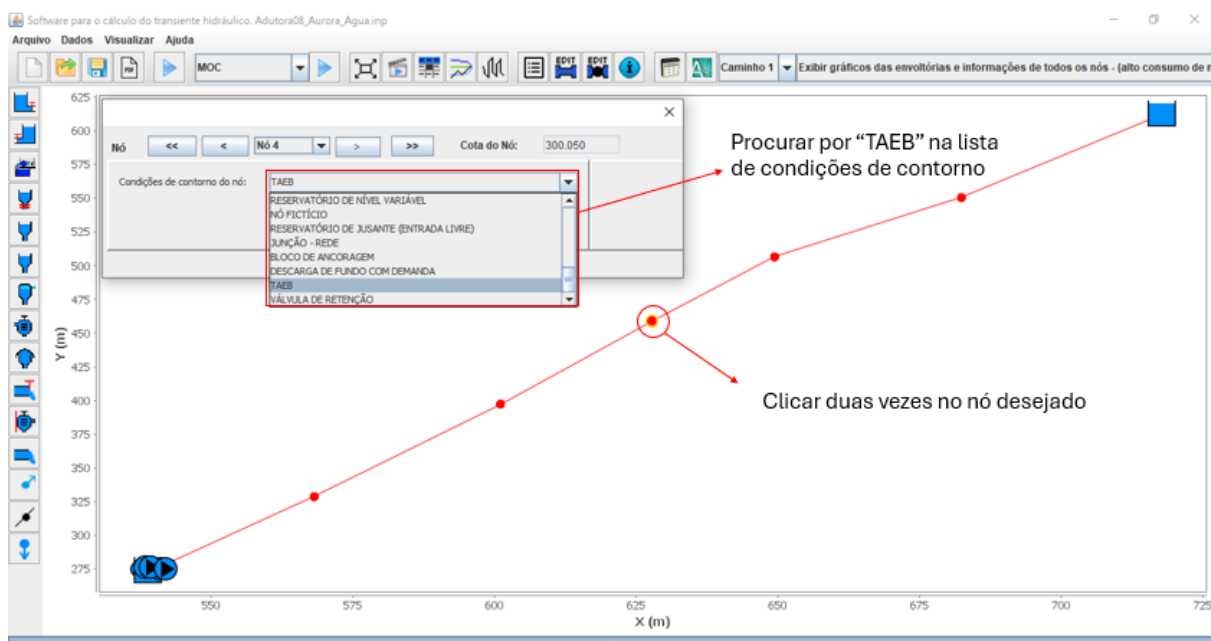
Figura 119 – Resultado da simulação sem dispositivos e indicação do ponto de menor pressão da adutora



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Dessa forma, prossegue-se com a inserção do TAEB no ponto indicado. Para isso, deve-se fechar a janela das envoltórias, retornar à tela inicial do UFC 7 e clicar duas vezes no ponto desejado. Realizando esse procedimento, será aberta a janela de condições de contorno. Deve-se procurar por "TAEB", conforme pode ser visualizado na Figura 120.

Figura 120 – Inserção do TAEB no nó desejado



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Após essa etapa, deve-se pressionar a opção “Especificação” para abrir a janela de configurações do TAEB. Essa janela pode ser observada na Figura 121 e é formada por algumas abas: “Dados do TAEB” (local onde são inseridos o Diâmetro interno do TAEB e o Nível máximo de água no TAEB) e “Dados do Tubo de Ligação” (local onde deve-se inserir o material e o diâmetro do tubo de ligação do TAEB, assim como o coeficiente de perda na entrada). Além disso, a interface também possui alguns botões, sendo os mais importantes: “Inserir Nova Ventosa” (botão que abre uma nova janela que permite que o usuário selecione os dados da Ventosa a ser inserida no TAEB) e “Verificar dados da Ventosa” (botão que permite verificar as informações da Ventosa inserida pelo usuário).

Figura 121 – Janela de configuração do TAEB no UFC 7

TAEB [X]

Dados do TAEB

☒ Diâmetro interno do TAEB - (m): 0.1

Nível Máximo de Água - Hmax (m): 1

Dados do Tubo de Ligação

Material: FOFO FLANGEADO PN 10

DN (mm): 80

Coeficiente de Perda na Entrada: 5.50

Memorial Inserir Nova Ventosa Verificar dados Ventosa

Instalação OK Cancel

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O primeiro passo, após aberta essa janela, é clicar no botão “Inserir Nova Ventosa”. Após isso, será aberta a janela da “Ventosa de Tríplice Função”, apresentada na Figura 122. O usuário deverá selecionar o DN da Ventosa e depois clicar na opção “Seleção da ventosa”, que abrirá uma janela com as curvas de Ventosa disponíveis no sistema para aquele diâmetro selecionado, conforme pode ser visualizado na Figura 123.

Figura 122 – Janela de configuração da Ventosa no TAEB no UFC 7

Ventosa de Triplíce função o (nó 4)

Dados da Ventosa

Altura Barométrica (bar): 1.01

☒ Pressão permanente (mca): -5.52

DN da Ventosa (mm): 25

Visualizar gráfico de pré-seleção da ventosa

☐ Cd constante ☒ Cd variável

Seleção da ventosa

Visualizar gráfico da vazão mássica de ar vs. pressão

Dados da Tubulação

Temp. Interna (°C): 25.00 Temp. Externa (°C): 24.00

Orifício Cinético

☐ Área do Orifício Cinético (mm²): 320.00

Pressão Diferencial de Fechamento Cinético (bar):

Coeficiente de Admissão de Ar: 0.480

Coeficiente de Expulsão de Ar: 0.480

Instalação Arquivo OK Cancel

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 123 – Janela contendo as curvas de Ventosa com DN = 25 mm disponíveis no UFC 7

Arquivo do Fabricante

Pesquisar em: 25

ARI_25_NS_.txt

ARI_25_TP_D-060.txt

BERMAD_25_NS_VEC_313.txt

BERMAD_25_TP_.txt

Nome do Arquivo:

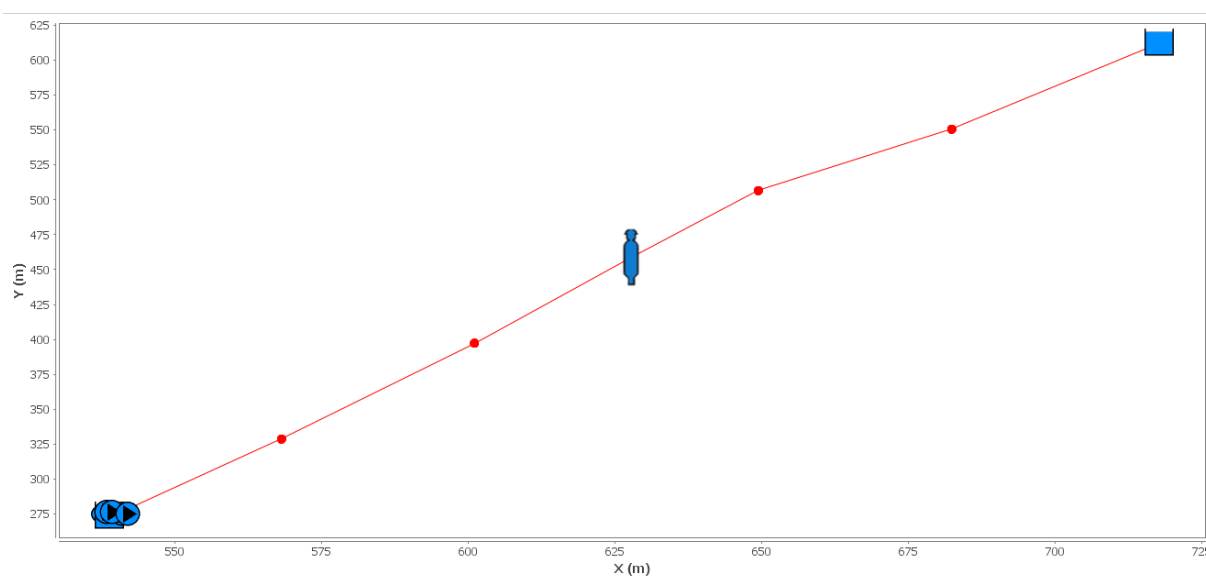
Arquivos do Tipo: Arquivo de Texto (*.txt)

Abrir Cancelar

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Após a seleção da Ventosa, o usuário poderá indicar qual diâmetro e altura do TAEB será considerada pelo modelo. Para isso, basta digitar o valor desejado nos devidos campos. Feito isso, pode-se clicar em “OK” e o TAEB será inserido no nó. A inserção do TAEB pode ser visualizada na Figura 124.

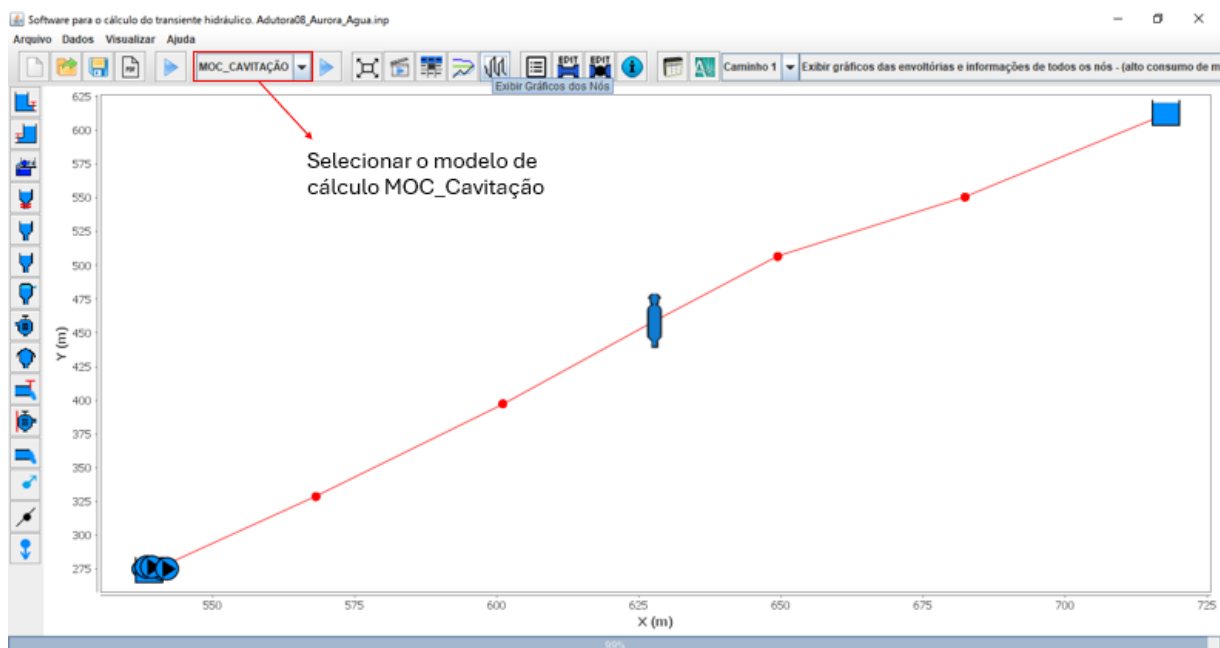
Figura 124 – TAEB corretamente inserido no nó desejado



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Com o TAEB inserido, pode-se realizar nova simulação. A simulação deverá ser realizada selecionando-se “MOC_Cavitação”, conforme pode ser visualizado na Figura 125. Para verificar os resultados de pressão e vazão, basta selecionar a opção “Exibir Gráfico dos Nós”. A janela seguinte após selecionada essa opção está apresentada na Figura 126, que permite a visualização dos resultados de vazão, carga piezométrica e pressão, além de sua exportação para o Excel. Para verificar o resultado de rebaixamento do nível de água no TAEB, é necessário clicar novamente no nó e, na janela de condições de contorno que se abrirá, deve-se selecionar a opção “Gráfico Dispositivo”, conforme Figura 127. O rebaixamento de água obtido nesta simulação está apresentado na Figura 128.

Figura 125 – Ferramenta para visualização dos resultados de vazão, carga e pressão nos nós



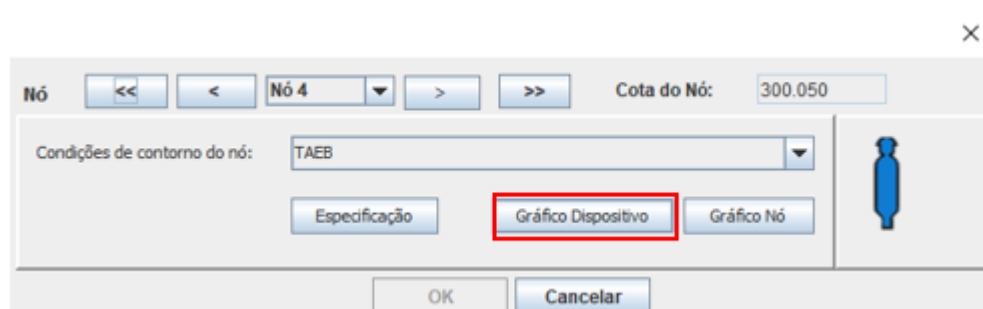
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 126 – Janela de visualização de resultados de vazão, carga e pressão



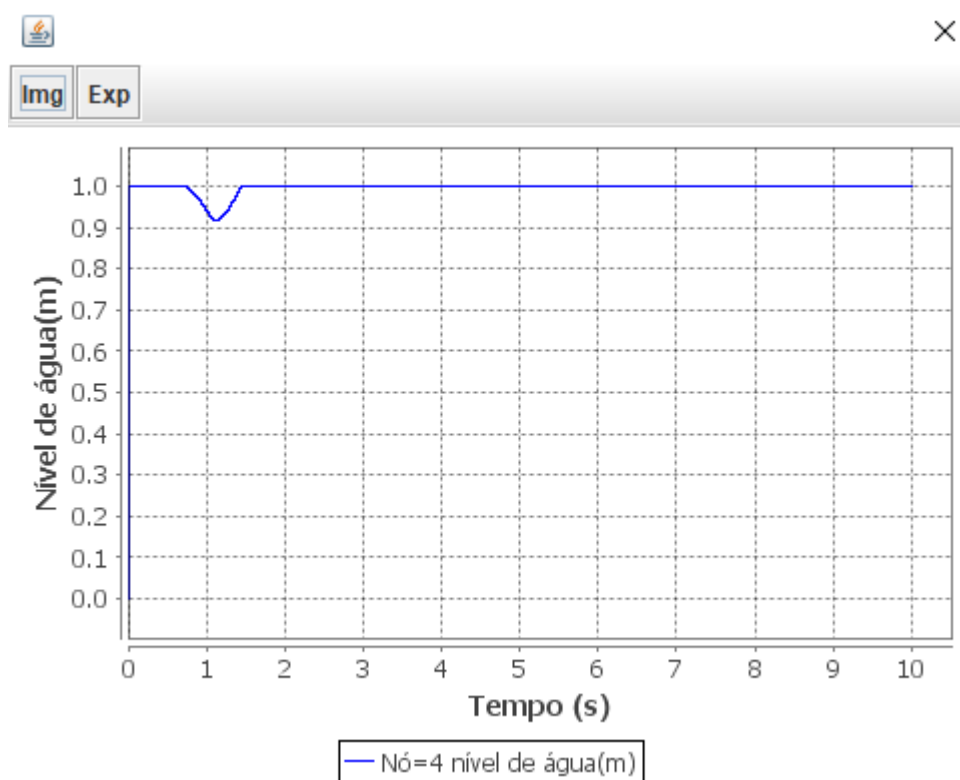
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 127 – Botão para visualização do resultado de rebaixamento do nível de água no TAEB



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 128 – Rebaixamento do nível de água ao longo do tempo de simulação no TAEB



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).