



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JAFÉ DE MACÊDO SANTOS

AVALIAÇÃO HIDRÁULICA DE UM SISTEMA ADUTOR COMPLEXO

Caruaru

2022

JAFÉ DE MACÊDO SANTOS

AVALIAÇÃO HIDRÁULICA DE UM SISTEMA ADUTOR COMPLEXO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Civil do Campus Agreste da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, na modalidade de artigo científico, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Engenharia Hidráulica.

Orientador: Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra

Caruaru

2022

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me ajudado durante toda a minha caminhada, me trazendo a paz que excede todo entendimento humano e por se tornar visível em cada detalhe do que acontece comigo.

Ao meu pai Valdeildo Rodrigues, que é meu maior orgulho e fonte de inspiração, por sempre ter batalhado em busca do melhor por minha família. A minha mãe Maria do Socorro, que é minha maior incentivadora, por ser meu ponto de apoio e por todo o amor por minha família. A minha irmã Elisama Macêdo, por sempre se fazer presente em todos os momentos da minha vida e por todo o amor.

Aos meus amigos de graduação: André Inácio, João Antônio, Joyce Rayanne, Phelipe Morais, Priscila Inês, Rômulo Macêdo e Welton Brenno; por todo o companheirismo durante esse tempo de graduação, que com certeza irão continuar presentes em minha vida. Aos meus companheiros de pesquisa: Andréia Azevedo e Sidrack Felipe, sem o apoio de vocês nas modelagens, este trabalho não seria possível.

Ao meu orientador, Professor Doutor Saulo de Tarso Marques Bezerra, pelo empenho dedicado a este trabalho, apoio, confiança e por ter despertado meu amor pelos recursos hídricos. A José Maria da Silva Júnior, que é minha inspiração na engenharia, por sempre ter acreditado em mim e pelo seu companheirismo.

A Universidade Federal de Pernambuco, pela oportunidade de fazer o curso que sempre sonhei e por permitir que fosse meu lar. A Companhia Pernambucana de Saneamento, pelo fornecimento de dados e materiais que foram fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa que possibilitou a realização deste trabalho.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CMB	Conjunto Motor-Bomba
EEAB	Estação Elevatória de Água Bruta
ETA	Estação de Tratamento de Água
SAA	Sistema de Abastecimento de Água

Avaliação hidráulica de um sistema adutor complexo
Hydraulic evaluation of a complex adductor system

Jafé de Macêdo Santos¹

RESUMO

A importância dos sistemas de abastecimento (SAA) de água para a humanidade é indiscutível, uma vez que a água vem se tornando um recurso cada vez mais limitado. Com isso, maneiras de gerir este bem de forma otimizada são cada vez mais necessárias. A modelagem dos SAA se apresenta como uma boa forma dessa gestão. Este trabalho teve como objetivo contribuir com a otimização do Sistema Adutor do Prata responsável por abastecer parte da região do Agreste de Pernambuco, por meio da modelagem hidráulica do sistema. O estudo foi realizado em três etapas principais, sendo estas: a caracterização do sistema; a modelagem do sistema; e, por fim, a análise dos resultados simulados. Na primeira parte foi possível entender como o sistema funciona. Além disso, nela foram obtidos todos os dados físicos e de funcionamento necessários para a modelagem, os dados foram fornecidos por meio de Companhia Pernambucana de Saneamento ou por meio de visitas técnicas. A partir disso, foi realizada a modelagem, através do programa EPANET, que é o modelo hidráulico mais utilizado no meio técnico e acadêmico. Desta forma, o sistema adutor foi calibrado e apresentou resultados satisfatórios. Por fim, uma breve análise do consumo de energia do sistema foi mostrada.

Palavras-chave: abastecimento; água; modelagem.

ABSTRACT

The importance of water supply systems (WSS) for humanity is indisputable, since water is becoming an increasingly limited resource. As a result, ways to manage this asset optimally are increasingly necessary. The modeling of WSS presents itself as a good form of this management. This work aimed to contribute to the optimization of the Adductor do Prata System responsible for supplying part of the Agreste region of Pernambuco, through the hydraulic modeling of the system. The study was carried out in three main stages, namely: the characterization of the system; system modeling; and, finally, the analysis of the simulated

¹Graduando em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco. E-mail: jafe.santos@ufpe.br

results. In the first part it was possible to understand how the system works. In addition, all the physical and operational data necessary for the modeling were obtained from it, the data were provided through Companhia Pernambucana de Saneamento or through technical visits. From this, the modeling was carried out, through the EPANET program, which is the most used hydraulic model in the technical and academic environment. In this way, the adductor system was calibrated and presented satisfactory results. Finally, a brief analysis of the energy consumption of the system was shown.

Keywords: supply. water. modeling.

DATA DE APROVAÇÃO: 04 de novembro de 2022.

1 INTRODUÇÃO

Os modelos de simulação hidráulica representam o meio mais eficaz e viável para estudar o comportamento dos sistemas de distribuição de água (BOULOS *et al.*, 2014). As capacidades preditivas desses modelos determinísticos fornecem uma ferramenta poderosa para avaliar a resposta dos sistemas sob várias alternativas operacionais e de gerenciamento destinadas a atingir metas de desempenho específicas. Além disso, o comportamento dos sistemas de abastecimento de água (SAA), assim como suas deficiências, não são facilmente perceptíveis de forma direta, sendo esses observados apenas quando o problema já se encontra em última instância, ou seja, por fatores já externos, como a falta de pressão nos locais, elevados volumes de perdas ou até mesmo a ausência de água. Problemas desse tipo geram desperdício de tempo e recursos que por meio de instrumentos de modelação e análise, poderiam ser facilmente evitados.

As principais aplicações da modelagem de um sistema de abastecimento de água, podem ser resumidas a seguir:

- a) Simulação de cenários de operação correntes, como consumos sazonais, gestão em sistemas abastecimento de água com múltiplos reservatórios, ou situações de emergência como falhas em estações elevatórias, etc.;
- b) Auxiliar no dimensionamento dos sistemas por meio da escolha de diâmetros e materiais para os tubos e componentes, e do dimensionamento de reservatórios e instalações elevatórias;
- f) Reabilitação de sistemas deficientes, e a programação das intervenções com minimização dos impactos aos consumidores;

- g) Avaliação de ações para redução e/ou recuperação da energia de bombeamento;
- i) Avaliações de ações de controle de perdas de água.

Dentre os programas desenvolvidos com fins não-comerciais para a simulação hidráulica, o EPANET 2.0 (ROSSMAN, 2002) se destaca por ser um simulador de domínio público (o que facilita a integração com algoritmos e outros *softwares*), compatível com outras ferramentas computacionais e amplamente aceito pela comunidade internacional. O código computacional e as bibliotecas do programa estão disponíveis gratuitamente. O EPANET é empregado frequentemente em vários campos de pesquisa em que há necessidade de aprimoramento contínuo dos SAA (GUIDOLIN *et al.*, 2010; YU *et al.*, 2010; RAMESH *et al.*, 2012; ABDELBAKI *et al.*, 2017). Este *software* permite executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade da água, incluindo o uso de tubulações, bombas, válvulas, reservatórios de nível fixo e/ou reservatórios de nível variável (GUIDOLIN *et al.*, 2010). Esse fornece valores de vazão nas tubulações, de pressão nos nós, nível de água nos reservatórios e de concentração de elementos químicos ao longo do período de simulação, subdividido em múltiplos intervalos de cálculo. O estabelecimento de cenários de projeto (por exemplo, expansão do sistema de abastecimento de água), a calibração de modelos hidráulicos, a análise do decaimento do cloro residual e a avaliação dos consumos são alguns exemplos de aplicação desta ferramenta. Nos últimos anos, diversos estudos direcionados à modelagem de sistemas de distribuição de água estão sendo publicados nos principais periódicos do mundo (GIUSTOLISI, 2016; AGUNWAMBA *et al.*, 2018; CHATZIVASILIS *et al.*, 2019), o que aponta que este trabalho está na fronteira da ciência.

Destaca-se que este trabalho foi parte do Projeto de Pesquisa e Inovação “Elaboração da modelagem operacional dos sistemas produtores integrados do Agreste Pernambucano” desenvolvido mediante convênio entre a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), a Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da UFPE (FADE) e a Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA), Processo N° 23076.050326/2019-18.

Nesse sentido, o presente trabalho tem como justificativa modelar e analisar o sistema adutor do Prata, de modo que as descobertas da pesquisa possam ser utilizadas para o melhor funcionamento da companhia de abastecimento local.

2 METODOLOGIA

Na primeira etapa do projeto foi feita uma revisão bibliográfica acerca do tema, para que se tivesse a base teórica adequada. O estudo sobre o tema foi realizado por meio de dissertações,

artigos e livros que auxiliaram na modelagem, calibração e avaliação do sistema adutor proposto. Após serem feitos todos os estudos necessários, foi dado o primeiro passo para a modelagem, que consistiu em obter diversos dados do sistema. Esses dados podem ser divididos em três grupos, sendo eles:

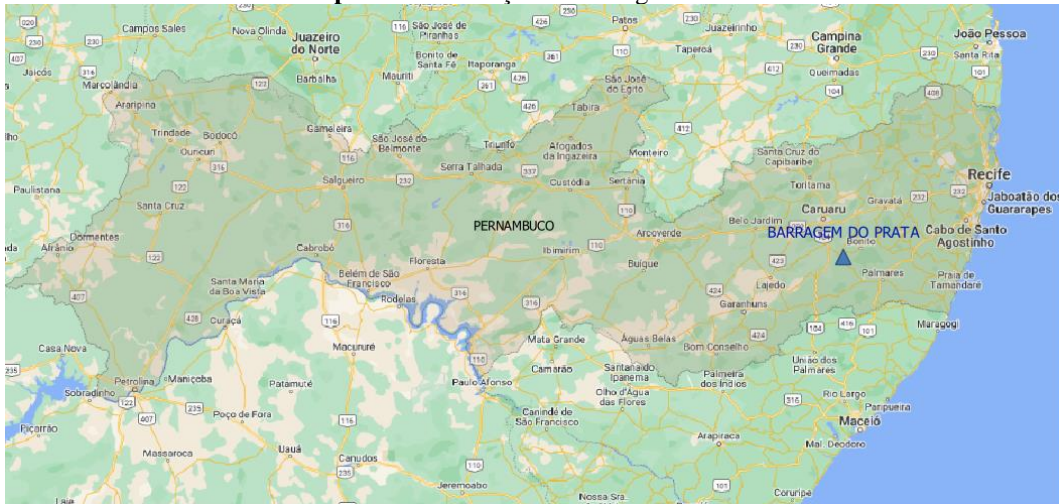
1. Elementos do sistema de abastecimento de água e suas características físicas (diâmetros, comprimentos e materiais das adutoras, modelo das bombas, etc.);
2. Informações dos consumidores (volumes consumidos ao longo do sistema);
3. Informações espaciais sobre a localização dos dados citados acima (cotas altimétricas dos reservatórios, coordenadas geográficas dos elementos a serem representados, etc.).

A obtenção desses dados foi feita por meio da Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA). Foram disponibilizados estudos em forma de documentos sobre o sistema adutor proposto, planilhas com diversos dados importantes para a modelagem, e plantas sobre o traçado do sistema, que se estende da captação aos municípios que são abastecidos. É importante ressaltar que, pelo grau de complexidade do sistema, a modelagem foi feita apenas na adutora principal, ou seja, da Barragem do Prata até a ETA Petrópolis. Para as ramificações da adutora foram utilizados artifícios no EPANET que serão posteriormente explicados.

2.1 Caracterização do Sistema Adutor do Prata

Um dos principais processos para a modelagem de adutoras é a caracterização do sistema, que tem como objetivo reunir todos os dados que foram obtidos, organizando-os para que o processo de modelagem possa ser iniciado, uma vez que o entendimento dos dados dos sistemas é fundamental para isso. Em relação ao Sistema Adutor do Prata, têm-se as seguintes informações: A barragem do Rio Prata foi construída em 1998 com o objetivo de complementar o abastecimento público de água das cidades de Caruaru, Agrestina, Altinho, Cachoeirinha e Ibirajuba. Sua capacidade de produção é de aproximadamente $970 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, sua captação é feita na Barragem do Prata localizada no Rio Prata – afluente do rio Una pela margem esquerda – cerca de 9 km a Oeste do município de Bonito. A bacia hidrográfica, delimitada a partir do barramento, tem área em torno de 74 km^2 , e a capacidade máxima de armazenamento do reservatório Prata é cerca de 42 milhões de metros cúbicos, sendo formado, nessas condições, uma bacia hidráulica de aproximadamente 700 hectares. Ao longo de seu traçado principal, que tem aproximadamente 30 quilômetros de extensão, o sistema tem três estações elevatórias principais e duas adutoras (Prata e Camevô). A localização da barragem pode ser observada no Mapa 1:

Mapa 1 – Localização da Barragem do Prata



Fonte: O autor (2022)

Uma informação importante a ser citada, é que esse sistema passou por uma implementação em 2018, sendo ela a construção do Sistema Pirangi, cuja captação é feita no Rio Pirangi, que por sua vez tem 1 adutora e 2 Estações Elevatórias até o poço de sucção da Estação Elevatória 1 do Prata. Essa implementação se deu devido as secas que estavam acontecendo na época, tornando o sistema inicial incapaz de suprir toda a demanda das cidades. Dessa forma, se fez necessário o incremento de vazão por meio da inserção do Sistema Pirangi. Entretanto, atualmente, o Sistema Pirangi encontra-se desativado, pois o nível da barragem do Prata, cerca de 80% da sua capacidade, é suficiente para o atendimento das demandas das cidades abastecidas pelo sistema em questão. As Fotografias 1 e 2 mostram a Barragem do Prata e parte de seu espelho d'água.

Fotografia 1 – Barragem do Prata



Fonte: O autor (2022)

Fotografia 2 – Espelho d'água da Barragem do Prata



Fonte: O autor (2022)

2.1.1 Estações elevatórias

As estações elevatórias do sistema são responsáveis pelo transporte de água bruta, pois a adutora principal só passa por uma estação de tratamento de água (ETA) em Caruaru. É importante ressaltar que a adutora principal passa também pela ETA Agrestina, localizada no município de Agrestina, entretanto, a água que é tratada na mesma não é distribuída para Caruaru, apenas para as outras cidades, sendo considerada neste ponto uma bifurcação, que retira parte de vazão total captada na barragem.

A adutora principal é composta por três estações elevatórias de água bruta (EEAB). A primeira é denominada EEAB-1 e se localiza na captação da Barragem do Prata com quatro conjuntos motor-bomba (CMB), a segunda é denominada EEAB-2 e se localiza próximo a entrada de Agrestina, às margens da PE-120 com quatro CMBs, por fim, a terceira é denominada EEAB-3 e se localiza na Serra da Quitéria, próximo às margens da BR-104 com quatro CMBs, entre a ETA Nova Agrestina e a ETA Petrópolis, em Caruaru. A Fotografia 3 mostra a EEAB-1.

Fotografia 3 – Estação Elevatória de Água Bruta Prata - 1



Fonte: O autor (2022)

É importante ressaltar que apesar de todas as três EEABs do sistema serem compostas por quatro CMBs, apenas três funcionam ininterruptamente, permanecendo um conjunto como reserva para ocasiões de manutenção, de acordo com a COMPESA. Outro fator a se citar é que todas as bombas se encontram afogadas, uma vez que a altura do nível de água do poço de sucção é superior ao nível delas. A Tabela 1 a seguir mostra um resumo das estações elevatórias do Sistema Adutor do Prata.

Tabela 1 – Características das estações elevatórias do sistema

Estação Elevatória	Nº de Bombas	Fabricante	Cota (m)
EEAB-1	3 + 1R	IMBIL	382,42
EEAB-2	3 + 1R	IMBIL	436,68
EEAB-3	3 + 1R	IMBIL	512,43

Fonte: O autor (2022)

2.1.2 Adutoras

O Sistema Adutor do Prata é composto por duas adutoras principais, Prata e Camevô, tendo respectivamente os diâmetros de 500 mm e 600 mm, margeando a PE 120 e a BR 104, que vão desde a EEAB-1 na Barragem do Prata até a ETA Petrópolis, em Caruaru, além das derivações para atender a ETA Agrestina que é responsável pelo atendimento das cidades de Agrestina, Altinho, Ibirajuba e Cachoeirinha. Existem ainda ao longo da adutora o atendimento de localidades rurais e distritos. Na Tabela 2, encontra-se um resumo de toda a adutora principal do sistema.

Tabela 2 – Características das adutoras do sistema

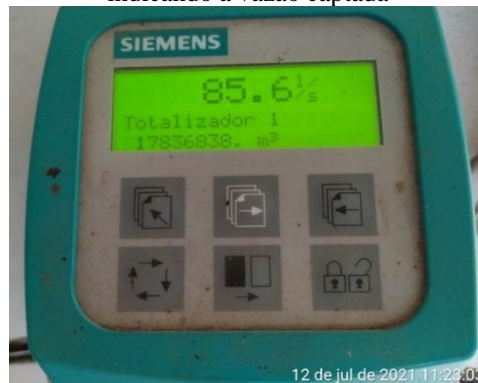
Trechos	DN	Comprimento (m)	Material	Rugosidade	Regime de escoamento
Barragem - EEAB-1	600	150	Ferro Dúctil	130	Gravidade
EEAB-1 – Barra de Riachão	500	5350	Aço	107	Recalque
Barra do Riachão – EEAB-2	500	6.800	Aço	107	Recalque
EEAB-1 – EEAB-2	600	12.150	Ferro Dúctil	91	Recalque
EEAB-2 – ETA Nova Agrestina	500	4.100	Aço	82	Recalque
ETA Nova Agrestina – EEAB-3	500	5.700	Aço	82	Recalque
EEAB-2 – EEAB-3	600	9.800	Ferro Dúctil	67	Recalque
EEAB-3 – Standpipe 1	500	6.400	Aço	130	Recalque
EEAB-3 – Standpipe 2	600	6.400	Ferro Dúctil	130	Recalque
Standpipe 1 – ETA Petrópolis	500	5.500	Aço	130	Gravidade
Standpipe 2 – ETA Petrópolis	600	5.500	Ferro Dúctil	130	Gravidade

Fonte: O autor (2022)

2.1.3 ETA Nova Agrestina

A ETA Nova Agrestina se encontra entre a EEAB-2 e a EEAB-3. É responsável pela principal bifurcação do sistema, visto que, é lá que a água é tratada e levada aos municípios de Cachoeirinha, Altinho, Agrestina e Ibirajuba. Sua capacidade nominal é de cerca de $100 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, entretanto, é interessante ressaltar que ela captura apenas uma pequena parte da vazão total do sistema. A Fotografia 4 apresenta o secundário do medidor de vazão eletromagnético instalado na ETA Nova Agrestina indicando a vazão captada.

Fotografia 4 – Secundário do medidor de vazão eletromagnético instalado na ETA Nova Agrestina indicando a vazão captada

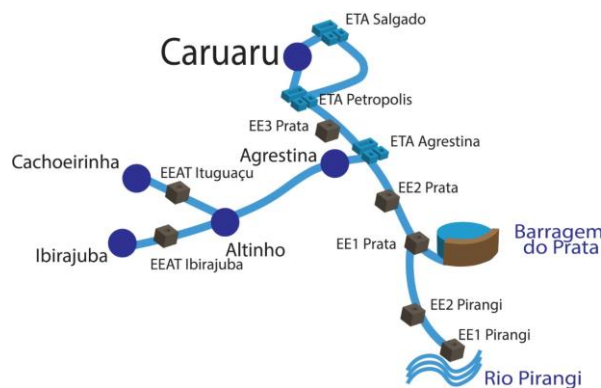


Fonte: O autor (2021)

2.1.4 Traçado do Sistema Adutor do Prata

O conhecimento do traçado do sistema adutor é de extrema importância para que possa ser inserido de forma a representar, de forma fiel, no *software*, o sistema real. Dessa forma, o resumo do traçado pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 – Traçado do Sistema Adutor do Prata-Pirangi



Fonte: COMPESA (2021)

2.2 Modelagem do Sistema

Após a caracterização do sistema, a modelagem pode ser iniciada. É importante ressaltar que uma boa caracterização é essencial para que a modelagem apresente resultados de boa qualidade e fiéis à realidade. Conforme Heller e de Pádua (2010), dados de entrada ruins, obtidos no processo de caracterização dos sistemas, gerarão consequentemente resultados de saída ruins, invalidando a posterior análise.

De acordo com Coelho, Loureiro e Alegre (2006), os modelos de simulação hidráulica permitem analisar e prever o comportamento hidráulico dos SAA de forma rápida e eficaz, sendo capazes de simular diversos cenários, sem que seja necessária a intervenção física dos sistemas.

Segundo Heller e de Pádua (2010), os modelos contribuem para que a prática da engenharia seja muito mais efetiva, já que por intermédio deles é possível estudar as soluções dos problemas nos sistemas de forma técnica, com rapidez e sem a necessidade de contratação de pessoal externo, gerando economia e melhorando a aplicação dos recursos públicos. Enaltecendo mais uma vez a eficiência da modelagem quando se diz respeito às tomadas de decisão nos SAA.

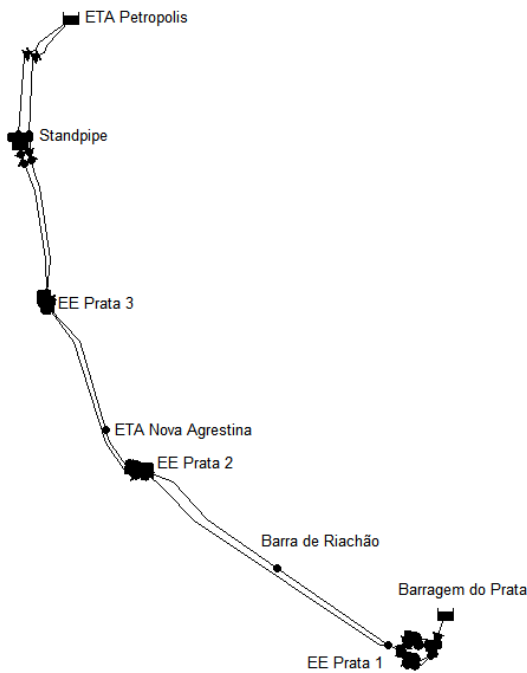
O programa escolhido para fazer a modelagem e as simulações hidráulicas foi o EPANET 2.0, que, de acordo com Rossman (2009), é um programa que permite executar simulações estáticas e dinâmicas do funcionamento de redes de abastecimento de água, possibilitando a inserção dos elementos físicos do sistema, como reservatórios, tubulações, bombas, válvulas e gerando resultados de extrema importância para os gestores das redes, como valores de vazão nas tubulações, pressões nos nós e altura de água nos reservatórios de nível variável. Ou seja, com ele é possível que se façam simulações da realidade sem que as mesmas tenham acontecido fisicamente, facilitando na tomada de decisões de implementar ou não um determinado projeto, por exemplo.

Para que fosse viabilizada a modelagem do sistema, foram avaliadas as diversas condições operacionais do sistema. A principal fonte de dados foi a COMPESA, que auxiliou bastante nesse processo, seja pelo fornecimento de dados do sistema e de seu funcionamento, ou por meio de visitas técnicas às suas principais localidades.

Após a coleta de dados do sistema, alguns *softwares* foram utilizados para o tratamento das informações e modelagem, pois, as plantas do sistema foram fornecidas em formato DWG. É importante ressaltar que o EPANET ainda não oferece a completa interação com um CAD ou com um sistema georreferenciado. Dessa forma, foi necessária a utilização de um *software*

auxiliar, o EPACAD para converter os arquivos provenientes do AutoCAD para INP (arquivo texto que pode ser aberto com "um editor de textos", no qual estão todos os elementos gráficos do modelo, tais como coordenadas dos nós, e não gráficos, como diâmetros das linhas e níveis de reservatórios), arquivo compatível com o EPANET. O EPACAD é um *software* livre que converte arquivos provenientes do AutoCAD, em arquivos no formato do EPANET, transformando linhas e poli linhas em trechos e nós. É importante ressaltar, que tanques bombas e válvulas têm que ser adicionados manualmente na interface do próprio simulador e que as demandas serão definidas com base em informações de consumo da população fornecidas pela COMPESA. Com isso, o traçado do sistema foi reproduzido no EPANET, como pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 – Traçado do Sistema Adutor do Prata no EPANET



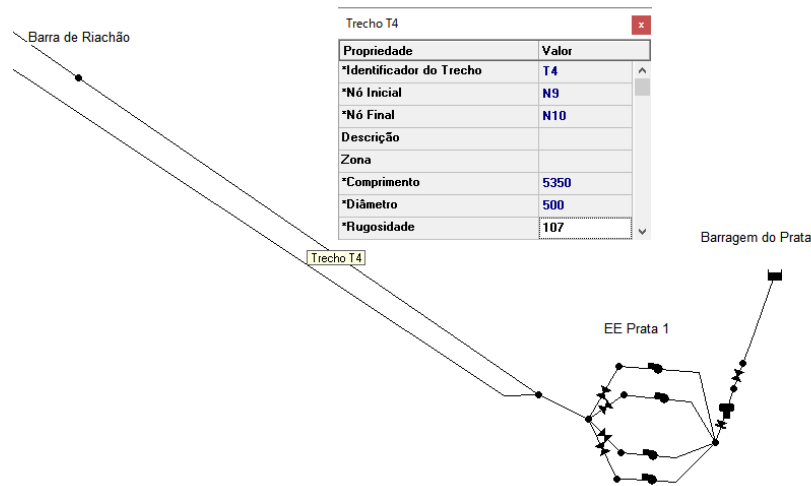
Fonte: O autor (2022)

Após a inserção de todos os elementos físicos pertinentes à modelagem no *software*, o passo seguinte consiste em inserir todos os dados físicos e de funcionamento obtidos na fase de caracterização do sistema no modelo. A inserção dos dados pode ser dividida por etapas, sendo elas: a inserção dos dados das adutoras, dos reservatórios, dos nós, das estações elevatórias, e por fim, das válvulas.

2.2.1 Inserção dos dados referentes às adutoras

A partir do traçado do sistema em consonância com a realidade, obtido por intermédio da conversão do arquivo em CAD para o EPANET, o próximo passo foi a inserção dos dados nas adutoras. As adutoras foram divididas por trechos, de modo a representar a evolução das mesmas ao longo do terreno. Considerou-se sempre um trecho entre elementos (reservatórios, estações elevatórias, pontos de sangria) podendo estes integrar derivações ou válvulas. Os dados de maior relevância para as adutoras utilizados foram: o nó inicial e final do trecho, o comprimento, o diâmetro e a rugosidade. Como exemplo, a Figura 3 mostra o editor de propriedades da adutora que liga a EEAB-1 ao nó que representa a sangria para Barra do Riachão. É importante frisar que os valores utilizados foram fornecidos pela COMPESA e podem ser encontrados na Tabela 2.

Figura 3 – Editor de propriedades de uma adutora



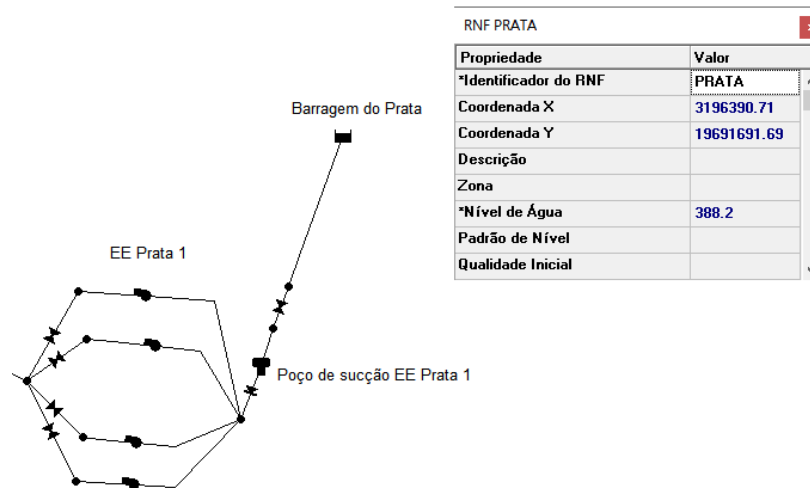
Fonte: O autor (2022)

2.2.2 Inserção dos dados referentes aos reservatórios

Os reservatórios foram introduzidos manualmente no modelo logo após os trechos das adutoras conforme as posições reais no sistema. O EPANET dispõe de dois tipos de reservatórios, sendo eles: Reservatórios de nível fixo (RNF) e os reservatórios de nível variável (RNV). De acordo com Rossman (2009), o RNF representa um volume de armazenamento de água, de capacidade ilimitada e carga hidráulica constante, já que, o seu nível d'água é sempre fixo. Os mesmos podem ser utilizados para simular os mananciais nos quais a captação será feita. Por outro lado, o RNV possui uma capacidade de armazenamento limitada e seu volume de água pode variar durante a simulação, dessa forma o EPANET interrompe a saída ou entrada de vazão do reservatório caso seja atingida a altura máxima ou mínima de água no mesmo. No

caso da modelagem em questão, os poços de sucção foram representados como RNVs e a Barragem do Prata foi representada por meio de um RNF, nos quais seus níveis d'água foram fornecidos pela COMPESA. A Figura 4 mostra o editor de propriedades do RNF que representa a Barragem do Prata.

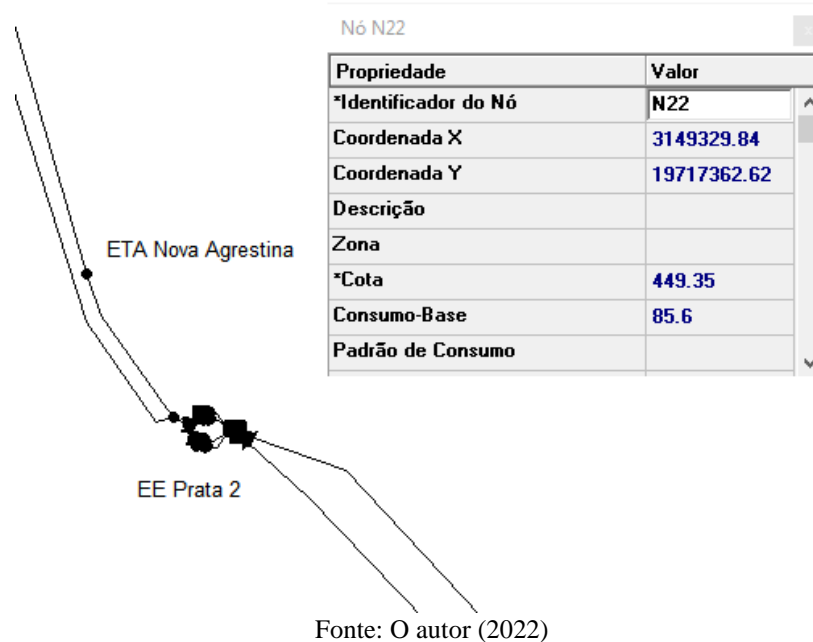
Figura 4 – Editor de propriedades de um RNF



Fonte: O autor (2022)

2.2.3 Inserção dos dados referentes aos nós

Os nós são pontos da rede que unem os trechos, no modelo de estudo, foram inseridos automaticamente por meio da conversão do traçado. Para eles, os dados mais importantes que precisam ser inseridos são: a cota acima de determinado nível de referência, nível do mar, e o consumo base, valor de extrema importância, pois retira parte da vazão do sistema. No sistema, os nós foram representados apenas onde havia consumos específicos consideráveis, sendo eles: o nó representando a sangria para Barra do Riachão, com um consumo aproximado de $5,0 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ e o nó representando a ETA Nova Agrestina, que retira uma quantidade considerável de água ininterruptamente do sistema para abastecer as cidades menores, com um consumo aproximado de $85,6 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$. A Figura 5 mostra o nó representativo da ETA Nova Agrestina, juntamente com sua vazão captada, de acordo com a Fotografia 4 mostrada anteriormente.

Figura 5 – Editor de propriedades de um nó

2.2.4 Inserção dos dados referentes às estações elevatórias

As estações elevatórias de água nos SAAs são caracterizadas como um conjunto de motor-bombas, válvulas e outros acessórios que captam a água de um poço de sucção. As bombas são os principais componentes das estações, porque, é através delas que a transferência de energia ocorre, aumentando a altura manométrica para o escoamento. Elas são essenciais para que a água possa ser transportada de cotas menores para cotas maiores. No sistema estudado, por exemplo, o ganho de elevação pode ser visto nitidamente, ou seja, do local da barragem até Caruaru, a diferença entre cotas é de cerca de 200,0 m, enaltecendo a importância das estações elevatórias para seu funcionamento.

Na modelagem, os dados necessários para as bombas são os nós inicial e final e a curva das bombas. As curvas características dos sistemas foram obtidas por meio de análises pitométricas nas visitas técnicas que foram feitas aos locais, porém, devido às dificuldades de medição relatadas pela própria COMPESA, não foi possível gerar um grupo de diferentes pontos para vazões com altura manométricas correspondentes, procedimento necessário para a confecção das curvas.

Outro ponto a se citar sobre a inserção das estações elevatórias na modelagem é que, em todas as três estações, apenas três das bombas funcionam ininterruptamente, com isso, no modelo, foram colocados quatro trechos com bombas, porém apenas três deles abertos, simulando justamente essa configuração.

2.2.5 Inserção dos dados referentes às válvulas

Por fim, o programa também oferece a possibilidade da colocação de válvulas para auxiliar no correto funcionamento do modelo. As válvulas utilizadas foram as válvulas sustentadoras de pressão (PSV) e as válvulas reguladoras de vazão (FCV). Na entrada dos RNVs sempre que necessário foram instalados uma válvula do tipo PSV para simular a entrada de água por cima nos reservatórios para correta simulação desta particularidade. Este tipo de válvula mantém o valor da pressão de entrada na válvula num determinado ponto da rede. É importante ressaltar que uma PSV não pode ser ligada diretamente a um reservatório. Deve-se utilizar sempre uma determinada extensão de tubulação para separar os dois componentes. Normalmente utiliza-se um trecho de tubulação de pequena extensão e de diâmetro elevado, para que a perda de carga seja desprezível. Já as FCVs, foram utilizadas nas saídas dos CMBs, possuindo a função de controlar a vazão de saída dos conjuntos. Esse tipo de válvula também não pode ser ligado diretamente a um reservatório.

Com todos os procedimentos acima completos, o Sistema Adutor principal do Prata foi modelado, e o passo seguinte consiste na calibração do mesmo.

2.3 Calibração do Sistema Adutor do Prata

Outra etapa essencial na modelagem de sistemas adutores é a de calibração, uma vez que, é por meio dela que é possível perceber o quão próximos os resultados estão da realidade. A partir desta etapa é que o refinamento dos dados é feito com o objetivo principal de tornar o modelo digital o mais fiel possível do sistema real. De acordo com Righetto (2001), a calibração representa uma das dificuldades encontradas ao implementar modelos hidráulicos, principalmente na obtenção de valores simulados compatíveis com os valores da realidade.

Outro fator a se citar sobre a calibração é que a forma de obtenção dos dados reais é de extrema importância, pois, se feita de maneira incorreta, compromete diretamente o resultado deste processo, pois a modelagem buscará encontrar resultados que não condizem com a realidade. Dessa forma, a correta obtenção dos dados de vazão e pressão nos sistemas é essencial, pois essas são as principais grandezas que refletem o comportamento hidráulicos dos mesmos.

Para o ajuste dos dados, diversos parâmetros podem ser alterados, sendo os mais comuns: o grau de abertura das válvulas, o coeficiente de rugosidade C das adutoras (utilizado na equação de perda de carga de Hazen-Williams) e as curvas características dos conjuntos motor-bomba

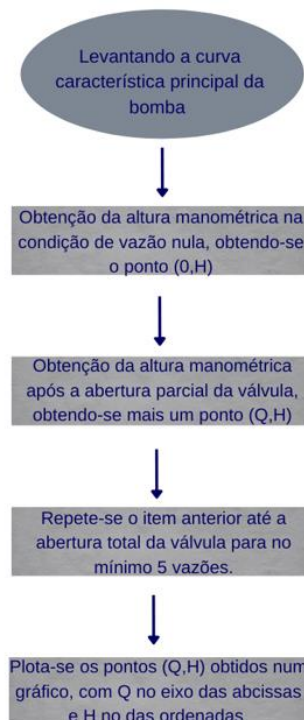
(CMBs). Com isso, a calibração se torna, portanto, um processo demorado e com muitas variáveis que alteram diretamente os valores obtidos na simulação, porém, o processo é considerado essencial para a completa modelagem do sistema.

2.3.1 Curvas características dos conjuntos motor-bomba

As curvas características dos CMBs foram uns dos parâmetros que participaram do processo de calibração. Elas são o que representam cada bomba, geralmente pela sua vazão e altura manométrica correspondentes, sendo esses parâmetros representados através de gráficos. Sua obtenção é de suma importância, porque, a vazão que será transportada por todas as adutoras do sistema depende delas, por meio de sua intercessão com a curva do sistema. Elas são traçadas pelos fabricantes a partir de ensaios e podem ser escolhidas pelos projetistas em função das necessidades do sistema adutor projetado.

Entretanto, principalmente em sistemas de abastecimento antigos, as informações são escassas e muitas vezes não se têm informações suficientes sobre os conjuntos motor-bomba. Com isso, existem outras maneiras para sua determinação. De acordo com Gomes e Carvalho (2012), os passos para o levantamento da curva característica principal de bombas podem ser descritos de acordo com a Figura 6.

Figura 6 – Etapas para o levantamento de curvas características de bombas



Fonte: O autor (2022)

Nota: Adaptado de Gomes e Carvalho (2012)

Dessa forma, os pontos de funcionamento das bombas foram obtidos através de análises pitométricas feitas pela COMPESA, assim como mostrado na Figura anterior, o ideal é que sejam feitas análises em diferentes cenários de funcionamento, para que se possa determinar a curva característica maior precisão, pois o gráfico plotado no EPANET será a representação dos pontos obtidos, com isso, quanto mais pontos forem obtidos, mais precisa a curva será. Além disso, recomenda-se realizar ensaios também em condições de funcionamento do conjunto de bombas distintas, como por exemplo, duas funcionando e duas desligadas ou apenas uma funcionando, uma vez que as estações elevatórias contemplam quatro CMBs. Para esta etapa, quanto mais formas de análise forem feitas, mais eficiente a calibração será, no entanto, em diversos casos não foi possível que isso fosse feito *in loco*, então recorreu-se ao uso dos dados nominais de projeto.

Nesse sentido, as curvas características dos CMBs do Sistema do Prata foram determinadas por meio do ponto médio de operação, pois, como os dados obtidos nas análises pitométricas foram bem próximos, devido ao procedimento não ter sido seguido da forma correta, alguns pontos observados não são representativos para a calibração. Através do EPANET, é possível se traçar as curvas com apenas um ponto de operação, processo que foi feito para este procedimento.

2.3.2 Coeficiente de Hazen-Williams C

Além das curvas características das bombas, outro parâmetro que pode ser obtido a partir da pitometria é o coeficiente C da equação de Hazen-Williams, que está relacionado à perda de carga entre pontos do sistema, demonstrando o estado físico em que as tubulações se encontram.

Foram instaladas duas estações pitométricas em cada trecho da adutora, para que se pudesse obter a pressão em cada uma delas e, a partir disso, relacionar os parâmetros na equação de perda de carga, que tem apenas o C como incógnita. Um fator importante a se citar é que a tubulação que está entre as estações não pode ter consumos ao longo do percurso de forma a garantir que a vazão que está passando na primeira seja igual a que está passando na segunda.

Após a obtenção das pressões e das características físicas das adutoras, fornecidas pela COMPESA, o coeficiente C foi determinado por meio da Equação 1:

$$C = \sqrt[1,85]{\frac{10,64 * Q^{1,85} * L}{h_f * D^{4,87}}} \quad (1)$$

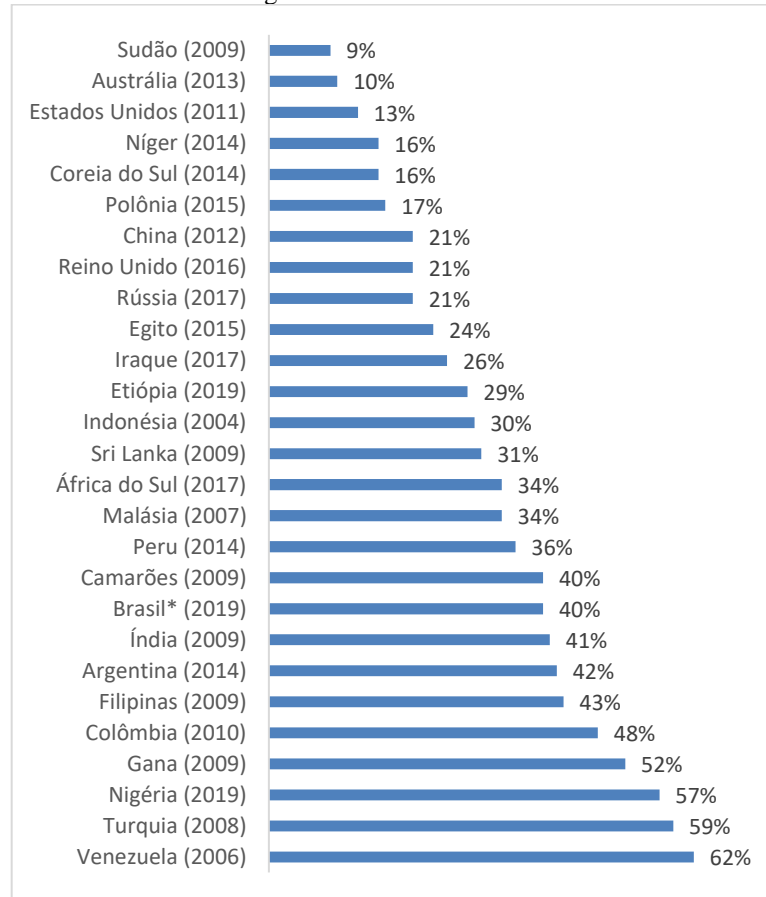
Na qual:

- H_f é a perda de carga (m);
- Q é a vazão (m^3/s);
- C é o coeficiente de perda de carga de Hazen-Williams
- D é o diâmetro da tubulação (m);
- L é o comprimento do trecho (m).

2.4 Análise do Consumo de Energia em Sistemas Adutores

O gasto com energia para todas as companhias de abastecimento de água sempre foi motivo pertinente de estudos no Brasil, porque os sistemas de abastecimento de água ainda apresentam altos índices de perdas de água e baixa eficiência energética. No Brasil, esses sistemas tiveram uma despesa com energia elétrica de R\$ 7,4 bilhões no ano de 2020, representando um aumento de 4,1% em relação aos R\$ 7,1 bilhões de 2019 (SNIS, 2020).

O maior problema desse custo, é que boa parte dele representa as perdas de água, gerando desperdícios de recursos públicos, que consequentemente são repassados aos usuários. Ou seja, as maneiras de eficiência energética não só beneficiam as companhias de abastecimento, mas também toda a população que é abastecida. O índice de perdas na distribuição de água no Brasil em 2020 foi de 40,1%, valor que é extremamente alto quando comparado com os países mostrados no Gráfico 1. Concentrando os valores na área de estudo, a região Nordeste apresenta ainda um valor superior ao nacional, pois tem cerca de 46,3% de perdas de água por ano, com Pernambuco intensificando ainda mais os resultados, com cerca de 49,9% de água perdida na distribuição (SNIS, 2020). Ou seja, praticamente metade da água captada é perdida no estado. Com isso, maneiras de gerir a energia eficientemente, se tornam cada vez mais essenciais.

Gráfico 1 – Perdas de água em sistemas de abastecimento no mundo

Fonte: O autor (2022)

Nota: Adaptado de GO associados (2021)

O estudo do consumo de energia do sistema em questão se deu por meio do fornecimento dos dados tanto de consumo, quanto de custo por meio da COMPESA. Foi disponibilizado o histórico dos anos de 2019, 2020 e dos três primeiros meses de 2021 das três estações elevatórias do Prata.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados em modelagens de sistemas adutores só podem ser observados após a finalização dos passos de caracterização e calibração, com isso a análise pode ser feita com a precisão adequada e, conseqüentemente, as tomadas de decisão são iniciadas.

É importante ressaltar que a Barragem do Prata foi feita utilizando um RNF, visto que a simulação feita foi de forma estática, pois de acordo com a COMPESA, o sistema funciona ininterruptamente. Além disso, como os RNVs intermediários na modelagem, poços de sucção, não possuem demandas e respeitam o mesmo princípio de não interrupção, não foram

necessárias simulações dinâmicas também.

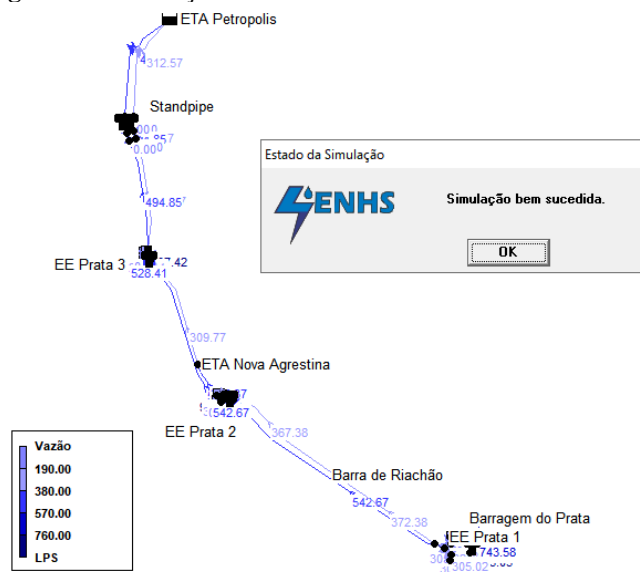
Dito isto, a análise da modelagem não necessariamente precisa ser exaustiva. O principal objetivo dela consistiu em entender como o sistema funciona e observar se as vazões e pressões estavam coerentes com os dados da realidade após a etapa de calibração.

3.1 Modelagem Hidráulica

A partir da modelagem hidráulica do Sistema Adutor do Prata, pôde-se observar seus resultados. É importante ressaltar que desde a primeira simulação, a qual não estava calibrada, o modelo já reunia diversas informações juntas, que facilitam o entendimento do mesmo e que dificilmente seriam reunidas em outro contexto, como por exemplo: o formato da rede, a localização dos elementos, o funcionamento das bombas, diâmetros das adutoras, etc. Dessa forma, a modelagem em si já se mostra um resultado para este trabalho. A Figura 7 representa o resultado de simulação bem sucedida do sistema. A Figura 8 representa o gráfico de isolinhas de cotas topográficas ao longo do sistema, para que se entenda como a diferença de nível ao longo do sistema funciona, enaltece-se a necessidade do uso das estações elevatórias. Sua representação abrange as principais adutoras do sistema, desde a captação, na Barragem do Prata, até a ETA Petrópolis em Caruaru-PE.

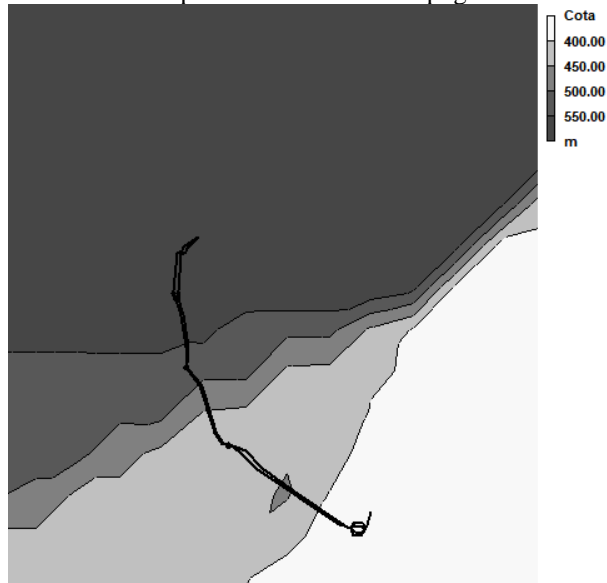
As cotas topográficas das estações elevatórias foram obtidas a partir do *software* QGIS 3.10. Por se tratar de uma simulação estática, o gráfico de isolinhas representando a pressão é dispensável.

Figura 7 – Simulação bem sucedida do Sistema Adutor do Prata



Fonte: O autor (2022)

Figura 8 – Distribuição de isolinhas representando as cotas topográficas do Sistema Adutor do Prata



Fonte: O autor (2022)

3.2 Calibração

O principal fator de calibração para o sistema foi a pitometria realizada pela COMPESA, por meio dela foi possível tanto comparar os valores do modelo com os reais, quanto confeccionar as curvas características dos CMBs. A princípio tiveram que ser feitas diversas simulações hidráulicas, ajustando sempre os dados para que houvesse a compatibilidade entre eles.

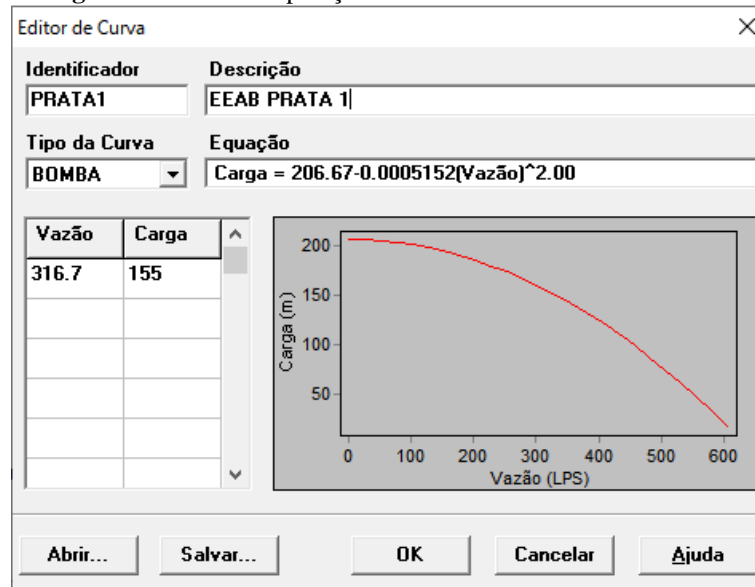
É válido ressaltar que a pitometria feita apresentou algumas dificuldades, como por exemplo, um dos CMBs da EEAB-1 apresentou problemas quando colocado para operar sozinho, tendo este que ser desconsiderado nesta etapa. Além disso, o passo a passo para a correta obtenção dos dados não foi feito em nenhuma das estações elevatórias, conforme a Figura 14. O que pode justificar possíveis discrepâncias entre os valores comparados.

Devido a essa limitação dos dados fornecidos pela COMPESA, ainda sim os dados da pitometria foram considerados, o que teve que ser feito foi a utilização de apenas um ponto de operação para as curvas características de cada estação elevatória. Destaca-se que cada estação elevatória possui três CMBs iguais funcionando e um reserva.

Como a EEAB-1 foi a que apresentou mais problemas no levantamento pitométrico, gerando resultados incoerentes, para sua calibração o procedimento realizado foi o de inserir os dados de vazão e pressão nominais obtidos *in loco* por meio das plaquetas das bombas como ponto de

operação para as suas curvas características. Dessa forma, seu ponto de operação foi de 316,7 L·s⁻¹ e 155 mca, como pode ser visto na Figura 9.

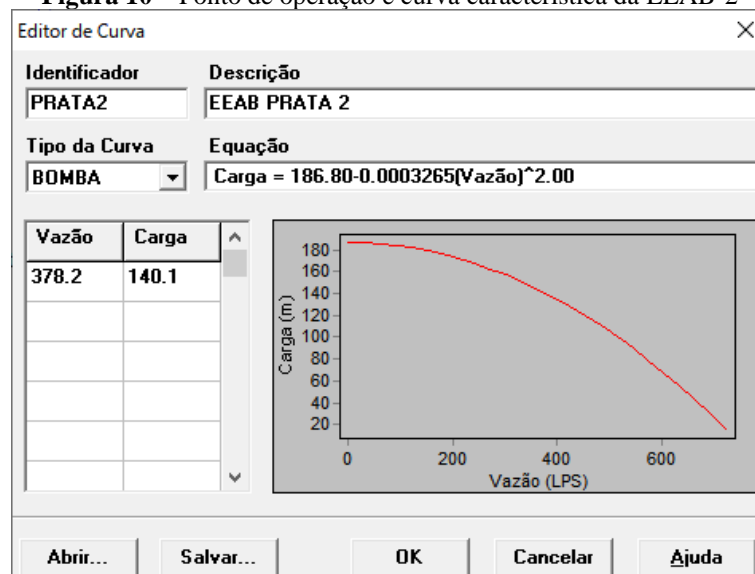
Figura 9 – Ponto de operação e curva característica da EEAB-1



Fonte: O autor (2022)

Para a EEAB-2, os pontos de operação foram obtidos por meio dos dados da pitometria, porém devido à proximidade da abertura das válvulas em seu processo de obtenção, os pontos se tornaram irrelevantes e, com isso, optou-se por utilizar também apenas um ponto para a confecção de sua curva, por meio do ponto médio entre os valores que foram fornecidos, sendo este com valores de 378,2 L·s⁻¹ e 140,1 mca, como pode ser visto na Figura 10 e na Tabela 3.

Figura 10 – Ponto de operação e curva característica da EEAB-2



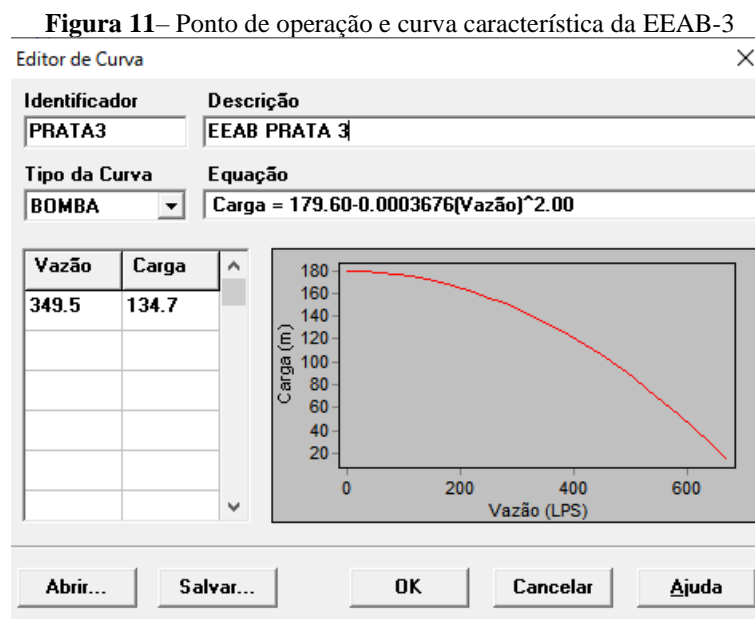
Fonte: O autor (2022)

Tabela 3 – Ponto de operação obtido através dos dados fornecidos pela pitometria para a EEAB-2

Estação elevatória	ID da Bomba	Vazão (L.s ⁻¹)	AMT (mca)
EEAB-2	1	349,70	141,40
EEAB-2	3	406,70	138,80
Valores médios	-	378,20	140,10

Fonte: O autor (2022)

Para a EEAB-3, o procedimento de obtenção de seu ponto de operação foi o mesmo da EEAB-2, dessa forma, seus valores são de 349,5 L.s⁻¹ e 134,7 mca, como pode ser visto na Figura 11 e na Tabela 4.



Fonte: O autor (2022)

Tabela 4 – Ponto de operação obtido através dos dados fornecidos pela pitometria para a EEAB-3

Estação elevatória	ID da Bomba	Vazão (L.s ⁻¹)	AMT (mca)
EEAB-3	2	334,47	134,64
EEAB-3	3	364,59	134,80
Valores médios	-	349,50	134,70

Fonte: O autor (2022)

Após a inserção das curvas características, o resultado comparativo entre os valores da modelagem e os reais pode ser observado na Tabela 5, juntamente com o erro percentual de cada trecho. Nela se pode observar que a EEAB-2 apresentou uma vazão um pouco maior quando comparada às outras duas na pitometria, provavelmente devido aos erros em seu processo. Além disso, observa-se também que a EEAB-3 apresenta uma vazão inferior quando comparada as outras, isso se dá pois o sistema tem uma bifurcação entre as estações elevatórias 2 e 3, para abastecer as cidades de Agrestina, Altinho, Cachoeirinha e Ibirajuba. Por fim,

ressalta-se que os valores apresentados na Tabela 5 foram simulados com o Coeficiente C igual a 100.

Tabela 5 – Comparativo de vazões e erro percentual entre os resultados da modelagem e os obtidos na pitometria do Sistema Adutor do Prata

Trecho	Vazão na pitometria (L·s ⁻¹)	Vazão na modelagem (L·s ⁻¹)	Erro (%)
EEAB-1 – EEAB-2	916,20	950,10	3,70
EEAB-2 – EEAB-3	927,90	949,70	2,35
EEAB-3 – ETA Petrópolis	824,60	817,70	0,84

Fonte: O autor (2022)

A partir da Tabela 5, pode ainda se observar que o maior erro se encontra entre as estações elevatórias 1 e 2, provavelmente devido aos problemas que foram citados com a pitometria da EEAB-1. Entretanto, o resultado se mostrou satisfatório para esse tipo de problema.

3.3 Cálculo do Coeficiente de Hazen-Williams C

Além da confecção das curvas características dos conjuntos motor-bomba, outro parâmetro que pode ser calculado fazendo uso da pitometria é o coeficiente C da equação de Hazen-Williams, que está diretamente relacionado com o tipo de material das adutoras e com o estado em que elas se encontram, se muito desgastadas ou não. Para seu cálculo, o que deve ser feito é a equação da diferença de energia entre os extremos de cada trecho. A partir do estudo pitométrico, só foi possível calcular o coeficiente para dois dos três trechos principais estudados, sendo estes o trecho entre as EEABs 1 e 2 e o trecho entre as EEABs 2 e 3. Ressalta-se que em todos os três trechos o sistema tem duas adutoras em paralelo, e com diâmetros diferentes.

Seu cálculo pode ser feito através da equação 1 anteriormente mostrada, nota-se da mesma que quanto maior o C, maior será a vazão no trecho, ou seja, valores de C maiores representam um melhor estado das adutoras. É importante ressaltar que existem Tabelas que mostram valores médios desse coeficiente em função do material das adutoras, entretanto, decidiu-se que seu cálculo fosse feito a partir dos dados fornecidos. O passo a passo para o cálculo do C consiste em primeiramente se calcular a perda de carga total H_f , nos dois pontos de análise. Para isso, são necessários os seguintes dados: As cotas topográficas dos dois pontos, obtidas por meio do *software* QGIS 3.10 e as pressões dos dois pontos. A diferença de energia entre eles será então a perda de carga total, dada em metros. Calculada a perda de carga, a equação 1 pode

então ser utilizada, tendo como incógnita apenas o coeficiente C, uma vez que os outros dados já foram fornecidos com o auxílio da pitometria ou dos relatórios da COMPESA. Dito isto, os valores de C calculados podem ser observados nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 – Valores de C para o trecho entre a EEAB-1 e a EEAB-2, diâmetros de 600 e 500mm

Parâmetros	Unidade	Valores
Z ₁	m	384,42
P ₁	mca	167
Z ₂	m	438,68
P ₂	mca	6,9
H _f	m	105,84
L	m	12150
Q ₆₀₀	m ³ /s	0,545
D ₆₀₀	m	0,615
Q ₅₀₀	m ³ /s	0,3712
D ₅₀₀	m	0,500
C₆₀₀	-	91,4
C₅₀₀	-	107,3

Fonte: O autor (2022)

Tabela 7 – Valores de C para o trecho entre a EEAB-2 e a EEAB-3, diâmetros de 600 e 500mm

Parâmetros	Unidade	Valores
Z ₁	m	438,68
P ₁	mca	233
Z ₂	m	514,43
P ₂	mca	6,7
H _f	m	150,55
L	m	9800
Q ₆₀₀	m ³ /s	0,542
D ₆₀₀	m	0,615
Q ₅₀₀	m ³ /s	0,3856
D ₅₀₀	m	0,500
C₆₀₀	-	66,88
C₅₀₀	-	82,04

Fonte: O autor (2022)

A partir das Tabelas acima, pode-se observar que os valores de C da Tabela 6 se encontram mais próximos dos resultados das tabelas para ferro fundido dúctil e aço, materiais que as adutoras são formadas. Por outro lado, os valores de C da Tabela 7 se apresentaram distantes do esperado para os mesmos material, como pode ser observado na Tabela 8, possivelmente por algum dado fornecido de forma errada. Com isso, os novos valores de C foram inseridos no

modelo, entretanto os resultados da Tabela 7 o deixou com um erro maior, como já era esperado, e com isso optou-se por utilizar os valores de C calculados na Tabela 6 em todos os trechos, pois a COMPESA informou que todos têm o mesmo material e têm em média a mesma idade, para um melhor resultado na calibração. A Tabela 9 mostra o novo comparativo das vazões nos trechos após a modificação do C nas adutoras comentadas.

Tabela 8 – Comparativo de vazões e erro percentual entre os resultados da modelagem e os obtidos na pitometria do Sistema Adutor do Prata utilizando os valores das Tabelas 6 e 7

Trecho	Vazão na pitometria (L·s ⁻¹)	Vazão na modelagem (L·s ⁻¹)	Erro (%)
EEAB-1 – EEAB-2	916,20	915,05	0,13
EEAB-2 – EEAB-3	927,90	753,99	18,74
EEAB-3 – ETA Petrópolis	824,60	807,42	2,08

Fonte: O autor (2022)

Tabela 9 – Comparativo de vazões e erro percentual entre os resultados da modelagem e os obtidos na pitometria do Sistema Adutor do Prata após a mudança do C

Trecho	Vazão na pitometria (L·s ⁻¹)	Vazão na modelagem (L·s ⁻¹)	Erro (%)
EEAB-1 – EEAB-2	916,20	915,05	0,13
EEAB-2 – EEAB-3	927,90	923,78	0,44
EEAB-3 – ETA Petrópolis	824,60	807,42	2,08

Fonte: O autor (2022)

Analisando os valores obtidos, pode-se observar que após a calibração, o erro diminuiu consideravelmente, tornando-o tão baixo que, para problemas de modelagem usualmente o erro sempre é maior, devido as oscilações do sistema ou o estado de conservação dos CMBs, válvulas e adutoras. Uma vez o sistema calibrado, resultando em erros da proporção da Tabela 8, a modelagem hidráulica do Sistema Adutor do Prata foi finalizada.

3.4 Análise do consumo de energia no Sistema Adutor do Prata

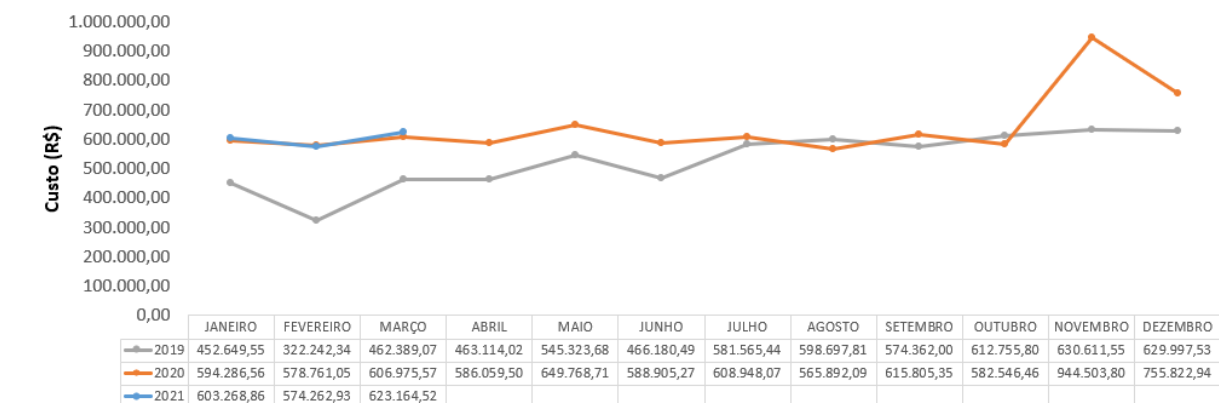
A análise do consumo de energia no Sistema Adutor do Prata consistiu no estudo dos dados fornecidos pela COMPESA. A Tabela 10 mostra o valor da fatura mensal média no período de janeiro de 2019 a março de 2021 para as três estações elevatórias.

Tabela 10 – Custo com energia nas estações elevatórias do Sistema Adutor do Prata

Local	Valor médio da fatura mensal (R\$)
EEAB-1	585.883,74
EEAB-2	521.800,88
EEAB-3	510.789,69
Sistema Adutor do Prata	1.618.474,31

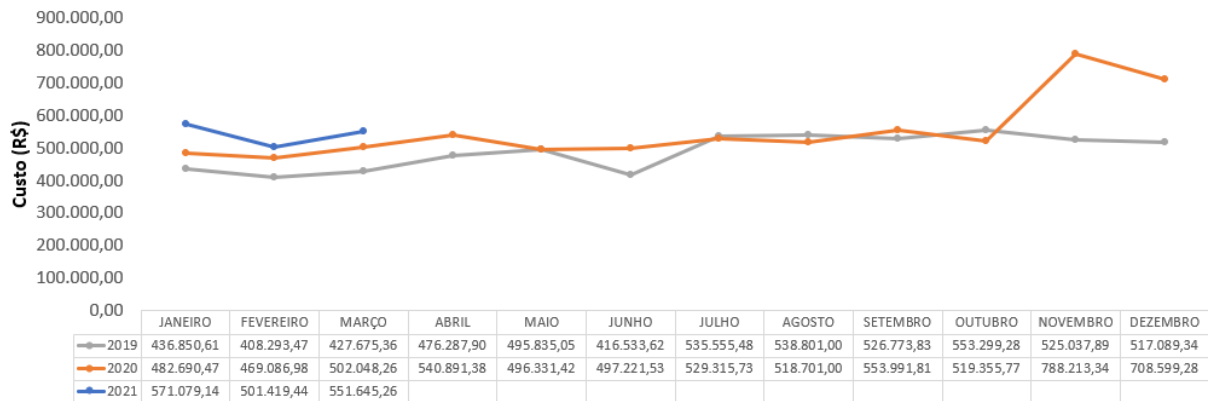
Fonte: O autor (2022)

Observa-se que apenas no Sistema Adutor do Prata a COMPESA gasta em média um milhão e seiscentos mil reais por mês. Existem maneiras de diminuir esse custo, e muitas delas podem ser investigadas através da modelagem dos sistemas, alterando dados físicos das tubulações ou a configuração dos CMBs, por exemplo. Métodos conhecidos podem ser aplicados, como evitar o máximo funcionamento das estações elevatórias nos horários em que a energia está mais cara, bombeando para reservatórios intermediários entre as estações em horários que seu custo é menor. Além disso, o ideal é investigar o estado das adutoras com frequência, uma vez que tubulações como incrustações internas exigem que uma maior potência seja requerida para aduzir a vazão entre os trechos, aumentando o custo de energia consequentemente. Para uma análise mais precisa entre os meses, os gráficos 2 a 4 representam, respectivamente, os custos mensais no período fornecido para as três estações elevatórias do sistema proposto.

Gráfico 2 – Custo da energia ao longo dos meses da EEAB-1 do Sistema Adutor do Prata

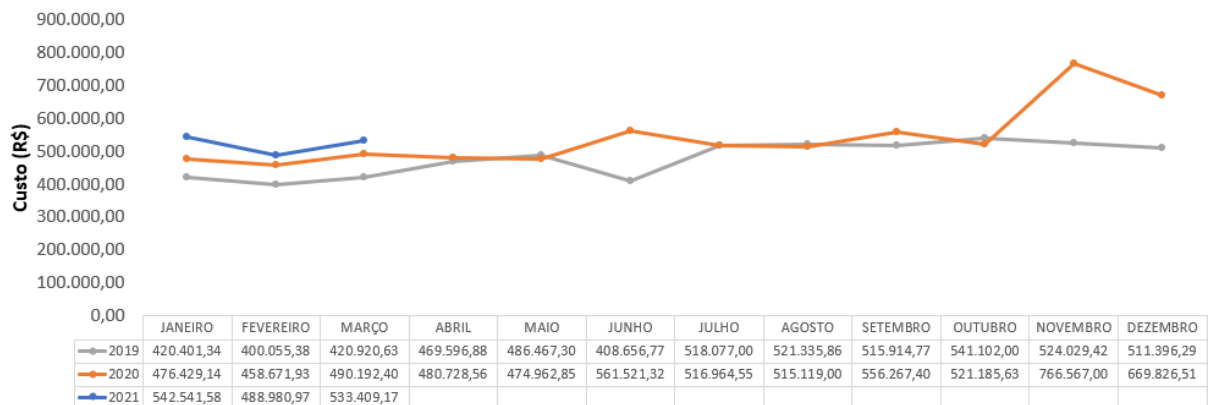
Fonte: O autor (2022)

Gráfico 3 – Custo da energia ao longo dos meses da EEAB-2 do Sistema Adutor do Prata



Fonte: O autor (2022)

Gráfico 4 – Custo da energia ao longo dos meses da EEAB-3 do Sistema Adutor do Prata



Fonte: O autor (2022)

4 CONCLUSÕES

A demanda de água mundial se tornou cada vez mais crescente com o passar dos anos, tornando sua possível escassez uma questão preocupante para todos. Maneiras de gerenciar os recursos hídricos, dessa forma, são de extrema importância, visto que, com as tomadas de decisões corretas e seu uso otimizado, esse problema pode ser mitigado. A utilização de modelagens em sistemas de abastecimento vem se tornando cada vez mais comum, justamente por proporcionar seus estudos de otimização de maneira digital, para gerar resultados otimizados fisicamente.

Em relação a este trabalho, o principal objetivo consistiu na modelagem do Sistema Adutor do Prata no *software* EPANET 2.0. Seus resultados a princípio apresentaram erros consideráveis, entretanto através dos métodos de calibração com o auxílio do conhecimento do sistema e de visitas *in loco* o resultado final se mostrou bastante satisfatório quando comparado

ao que usualmente acontece em modelagens hidráulicas.

Apesar das dificuldades nos processos de pitometria, os ajustes feitos nas curvas características dos CMBs e nos coeficientes C da equação de Hazen-Williams se mostraram benéficos no processo de calibração. Esse processo é essencial para a utilização futura do modelo, pois é por meio dele que se pode observar o quão próximo a modelagem está da realidade.

Por fim, em relação aos custos com energia do Sistema Adutor do Prata, observou-se que ao longo dos anos fornecidos eles vêm aumentando. Com isso, com o auxílio da utilização do modelo produzido, podem ser desenvolvidas soluções para que eles sejam diminuídos, como a verificação da não utilização completa dos CMBs nos horários de pico, por exemplo.

REFERÊNCIAS

ABDELBAKI, Chérifa *et al.* Management of a water distribution network by coupling GIS and hydraulic modeling: a case study of Chetouane in Algeria. **Applied Water Science**, v. 7, n. 3, p. 1561-1567, 2017.

AGUNWAMBA, J. C.; EKWULE, O. R.; NNAJI, C. C. Performance evaluation of a municipal water distribution system using WaterCAD and Epanet. **Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development**, v. 8, n. 3, p. 459-467, 2018.

BOULOS, Paul F. *et al.* Real-time modeling of water distribution systems: A case study. **Journal-American Water Works Association**, v. 106, n. 9, p. 391-401, 2014.

CHATZIVASILI, Stavroula; PAPADIMITRIOU, Katerina; KANAKOUDIS, Vasilis. Optimizing the formation of DMAs in a water distribution network through advanced modelling. **Water**, v. 11, n. 2, p. 278, 2019.

COELHO, S. T.; LOUREIRO, D.; ALEGRE, H. **Modelação e análise de sistemas de abastecimento de água**. Instituto Regulador de Águas e Resíduos (IRAR) e Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 2006.

COMPANHIA PERNAMBUCANA DE SANEAMENTO – COMPESA. **Nota técnica: sistema de abastecimento integrado Prata (Camevô) – Pirangi, atendimento a caruaru e cidades ao longo da adutora – PE**. Recife – PE. 2020.

GIUSTOLISI, Orazio. Enhanced WDN Hydraulic Modelling and Detection of Burst Leakages. **Procedia engineering**, v. 162, p. 3-14, 2016.

GUIDOLIN, M. *et al.* CWSNet: An object-oriented toolkit for water distribution system simulations. In: **Water Distribution Systems Analysis 2010**. p. 1-13, 2010.

GOMES, H. P.; CARVALHO, P. O. D. **Manual de Sistemas de Bombeamento Eficiência Energética**. 1ª Edição. João Pessoa: Editora Universitária, 2012.

ROSSMAN, L. A. **EPANET 2.0 – manual do usuário**. Tradução e adaptação do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS) – Universidade Federal da Paraíba – UFPB. João Pessoa – PB, Brasil, p. 17-34, 2009.

HELLER, L.; DE PÁDUA, V. L. **Abastecimento de água para consumo humano**. 2º ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010.

Perdas de água 2021 (SNIS 2019): Desafios para disponibilidade hídrica e avanço da eficiência do saneamento básico. **Trata Brasil**, 2020. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br/perdas-de-agua-potavel-2021-ano-base-2019-desafios-para-a-disponibilidade-hidrica-e-ao-avanco-da-eficiencia-do-saneamento-basico/>. Acesso em 28/08/2022.

RAMESH, H.; SANTHOSH, L.; JAGADEESH, C. J. Simulation of hydraulic parameters in water distribution network using EPANET and GIS. In: **International conference on ecological, environmental and biological sciences, Dubai**. p. 350-353, 2012.

RIGHETTO, Antonio Marozzi. Calibração de modelo hidráulico de rede de distribuição de água. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 3, p. 33-44, 2001.

ROSSMAN, L. **EPANET 2.0. USEPA Water Supply and Water Resources Division, 2002.**

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria de Saneamento Ambiental. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos serviços de água e esgoto – 2021.

YU, Tian *et al.* Construction of water supply pipe network based on GIS and EPANET model in Fangcun District of Guangzhou. In: **2010 Second IITA International Conference on Geoscience and Remote Sensing**. IEEE. p. 268-271, 2010.

JAFÉ DE MACÊDO SANTOS

AVALIAÇÃO HIDRÁULICA DE UM SISTEMA ADUTOR COMPLEXO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Civil do Campus Agreste da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, na modalidade de artigo científico, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Engenharia Hidráulica.

Aprovado em 04 de novembro de 2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Edevaldo Miguel Alves (Avaliador)
Universidade Federal de Pernambuco

M.Sc. Sidrack Felipe da Silva Júnior (Avaliador)