



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E**  
**AMBIENTAL**

**SIDRACK FELIPE DA SILVA JÚNIOR**

**AVALIAÇÃO DE SISTEMAS ADUTORES POR MEIO DA**  
**MODELAGEM HIDRÁULICA**

Caruaru

2022

SIDRACK FELIPE DA SILVA JÚNIOR

**AVALIAÇÃO DE SISTEMAS ADUTORES POR MEIO DA  
MODELAGEM HIDRÁULICA**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental. Área de concentração: Tecnologia Ambiental.

**Orientador:** Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra

Caruaru  
2022

Catálogo na fonte:  
Bibliotecária – Paula Silva - CRB/4 - 1223

S586a Silva Júnior, Sidrack Felipe da.  
Avaliação de sistemas adutores por meio da modelagem hidráulica. / Sidrack Felipe da Silva Júnior. – 2022.  
107 f.; il.: 30 cm.

Orientador: Saulo de Tarso Marques Bezerra.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2022.  
Inclui Referências.

1. Abastecimento de água. 2. Estruturas hidráulicas. 3. Software. 4. Calibração. 5. Água – Consumo. 6. Avaliação. I. Bezerra, Saulo de Tarso Marques (Orientador). II. Título.

CDD 620 (23. ed.) UFPE (CAA 2022-035)

SIDRACK FELIPE DA SILVA JÚNIOR

**AVALIAÇÃO DE SISTEMAS ADUTORES POR MEIO DA  
MODELAGEM HIDRÁULICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental.

Aprovada em: 28 / 07 / 2022.

**BANCA EXAMINADORA**

---

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

---

Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Profa. Dra. Laís Regis Salvino (Examinadora Externa)  
Universidade Federal da Paraíba

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, pois a caminhada não é fácil. Nesses momentos a oração e a fé nos mantém firme para que possamos alcançar os objetivos.

À minha família por toda paciência e ajuda em todo e qualquer momento.

Aos amigos da UFPE, que sempre me ajudaram e fizeram com que a conclusão desse trabalho fosse possível. Um agradecimento especial a Andréia Azevedo, Elyaquim Tôres e Jafé Macedo por todo apoio nas modelagens e visitas técnicas ao campo. Sem vocês, esse trabalho não seria possível. Por fim, mas não menos importante, um agradecimento mais do que especial à minha amiga Maria das Graças, por todo seu apoio em todo o mestrado.

Ao professor Saulo de Tarso Marques Bezerra, pelo suporte, orientação, disposição para tirar dúvidas, tornando esse trabalho possível de ser realizado.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para realização desse objetivo.

## RESUMO

O presente trabalho visa à avaliação dos sistemas produtores de água que abastecem o Agreste Pernambucano por meio de modelagem hidráulica. Deste modo, a construção de modelos hidráulicos calibrados e sua análise quanto ao comportamento hidráulico foram fundamentais para alcançar os objetivos traçados. O desenvolvimento da modelagem foi realizado no *software* EPANET, programa desenvolvido pela *U. S. Environmental Protection Agency* (USEPA). Após a construção e calibração dos modelos, foi realizada uma análise de sensibilidade da vazão em relação ao comportamento do coeficiente de Hazen-Williams C. Os resultados demonstram que apenas o sistema adutor do Prata é mais sensível à variação deste coeficiente. Além disso, foi verificada, por meio da modelagem, a capacidade dos sistemas adutores em funcionamento quanto ao atendimento da demanda da cidade de Caruaru-PE. Nesse sentido, foi verificado que o sistema adutor de Jucazinho, isoladamente, não consegue atender à demanda da cidade. O sistema adutor Prata consegue atender a demanda atual, porém em relação às demandas futuras, o sistema teria dificuldade de atendimento chegando a um nível de déficit. Ademais foi verificado que, caso o sistema adutor Prata funcionasse em conjunto com o sistema Pirangi ou sistema adutor de Jucazinho, essa combinação seria suficiente para o atendimento da demanda de Caruaru. Em relação ao atendimento da demanda, um importante fator é o índice de perdas de água na distribuição, que está diretamente relacionado a quantidade de pessoas atendidas, de modo que, ao reduzir esse índice, a população atendida seria maior. Por fim, com as simulações feitas e os resultados obtidos, pode-se dizer que os modelos produzidos no *software* correspondem, em grau satisfatório, à realidade encontrada nos sistemas reais.

**Palavras-chave:** sistemas adutores; modelagem hidráulica; EPANET; calibração; demanda de água.

## ABSTRACT

The present thesis aims to evaluate the water-producing systems that supply the region of Agreste in Pernambuco through hydraulic modeling. In this way, the construction of calibrated hydraulic models and their analysis regarding the hydraulic were fundamental to achieve the outlined objectives. The model development was carried out using the EPANET software, a program developed by the U. S. Environmental Protection Agency (USEPA). After development and calibration of the models, a sensitivity analysis of the flow was performed in relation to the behavior of the Hazen-Williams C coefficient. The results show that only the Prata Pipeline System is more sensitive to the variation of this coefficient. In addition, through modeling, the capacity of the adductor systems in operation in terms of meeting the demand of the city of Caruaru-PE was verified. In this way, it was found that the Jucazinho Pipeline System, by itself, cannot meet the city's demand. The Prata Pipeline System is able to meet the current demand, but in relation to future demands, the system would have difficulty meeting them, resulting in a deficit level. Furthermore, it was verified that, if the Prata Pipeline System were to work in tandem with the Pirangi Pipeline System or the Jucazinho Pipeline System, this combination would be sufficient to meet Caruaru's demand. In relation to meeting demand, an important factor is the rate of water loss in distribution, which is directly related to the number of people served. Therefore, by reducing this rate, the population served would be greater. In conclusion, with the simulations performed and the results obtained, it can be said that the models produced in the software correspond, to a satisfactory degree, to the reality found in real systems.

**Keywords:** Pipeline systems; hydraulic modeling; EPANET; calibration; water demand.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Fases do desenvolvimento do modelo hidráulico.....	22
Figura 2 –	Metodologia para modelagem hidráulica.....	22
Figura 3 –	Etapas para obtenção de um modelo hidráulico.....	23
Quadro 1 –	Características dos modelos de simulação hidráulica.....	23
Quadro 2 –	Objetivos do uso da modelagem.....	24
Gráfico 1 –	Número de estudos, por ano, que adotaram o <i>software</i> EPANET de acordo com a plataforma SCOPUS. Data: 10/04/2022.....	28
Quadro 3 –	Artigos em periódicos que adotaram a modelagem hidráulica em suas metodologias.....	30
Mapa 1 –	Traçado do sistema adutor de Jucazinho.....	35
Figura 4 –	Esquema reduzido do sistema adutor de Jucazinho.....	38
Mapa 2 –	Traçado do sistema adutor do Prata.....	39
Figura 5 –	Esquema resumido do sistema Prata-Pirangi.....	40
Mapa 3 –	Traçado do sistema adutor do Alto Capibaribe.....	42
Mapa 4 –	Traçado do sistema adutor de Serro Azul.....	44
Quadro 4 –	Informações necessárias à construção do modelo.....	47
Quadro 5 –	Unidades das grandezas da modelagem.....	48
Figura 6 –	Representação do traçado de uma adutora no <i>software</i> EPANET.....	49
Figura 7 –	Válvula <i>PSV</i> à montante e válvula <i>CV</i> à jusante do reservatório.....	50
Figura 8 –	RNF, estação elevatória e válvulas da adutora do Prata.....	51
Figura 9 –	Identificação de nós de consumo.....	52
Fotografia 1 –	Estação elevatória 3 do sistema adutor Prata.....	53
Fotografia 2 –	Estação elevatória 5, Tramo Sul, sistema Jucazinho.....	54
Figura 10 –	Curva característica da estação elevatória principal do sistema adutor do Alto Capibaribe.....	54
Mapa 5 –	Localização do município de Caruaru-PE.....	64
Figura 11 –	Simulação do Tramo Sul do sistema adutor de Jucazinho.....	70

Figura 12 –	Simulação do Tramo Norte do sistema adutor de Jucazinho.....	70
Figura 13 –	Simulação do sistema adutor Prata.....	71
Figura 14 –	Simulação do sistema adutor Serro Azul.....	71
Figura 15 –	Simulação do sistema adutor Alto Capibaribe.....	72
Gráfico 2 –	Análise gráfica da relação existente entre os valores da modelagem e da pitometria.....	74
Gráfico 3 –	Análise gráfica da relação existente entre os valores da modelagem e da pitometria – Tramo Sul do sistema adutor Jucazinho.....	78
Gráfico 4 –	Análise gráfica da relação existente entre os valores da modelagem e da pitometria – Tramo Norte do sistema adutor de Jucazinho.....	80
Gráfico 5 –	Gráfico de dispersão da relação entre os valores de vazão modelado e os obtidos da análise pitométrica.....	81
Figura 16 –	Curva característica da estação elevatória de captação do sistema Alto Capibaribe.....	82
Figura 17 –	Curva característica da EEAB-1 do sistema adutor Serro Azul.....	83
Figura 18 –	Curva característica da EEAB-2 do sistema adutor Serro Azul.....	83
Gráfico 6 –	Variação das vazões bombeadas nas estações elevatórias do Tramo Sul do sistema adutor Jucazinho em função do Coeficiente de Hazen-Williams C.....	87
Gráfico 7 –	Variação das vazões bombeadas nas estações elevatórias do Tramo Norte do sistema adutor Jucazinho em função do Coeficiente de Hazen-Williams C.....	87
Gráfico 8 –	Variação das vazões bombeadas nas estações elevatórias do sistema adutor Prata em função do Coeficiente de Hazen-Williams C.....	88
Gráfico 9 –	Variação das vazões bombeadas nas estações elevatórias do sistema adutor Serro Azul em função do Coeficiente de Hazen-Williams C.....	88

Gráfico 10 –	Gráfico de dispersão da relação Vazão x Coeficiente C do sistema adutor Jucazinho, Tramo Sul.....	89
Figura 19 –	Vazão da EEAB-3 do sistema adutor Prata, com uma bomba em funcionamento.....	91
Figura 20 –	Vazão da EEAB-3 do sistema adutor Prata, com três bombas em funcionamento.....	91
Gráfico 11 –	Consumo médio <i>per capita</i> dos estados brasileiros.....	94
Gráfico 12 –	Projeção populacional.....	95
Gráfico 13 –	Análise gráfica da relação entre o índice de perdas de água e a população atendida.....	98

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Características das estações elevatórias do sistema adutor de Jucazinho.....	36
Tabela 2 –	Características dos trechos da adutora Jucazinho por Tramo.....	37
Tabela 3 –	Características das estações elevatórias do sistema adutor Prata.....	40
Tabela 4 –	Características dos trechos do sistema adutor Prata.....	41
Tabela 5 –	Características das estações elevatórias do sistema do Alto Capibaribe.....	43
Tabela 6 –	Características dos trechos da adutora do Alto Capibaribe.....	43
Tabela 7 –	Características das estações elevatórias do sistema adutor de Serro Azul.....	45
Tabela 8 –	Características dos trechos da adutora de Serro Azul.....	45
Tabela 9 –	Dados de pitometria da EEAB-2 do sistema adutor Prata.....	73
Tabela 10 –	Dados de pitometria da EEAB-3 do sistema adutor Prata.....	73
Tabela 11 –	Comparativo de vazões determinadas pelo modelo hidráulico e a pitometria para o sistema adutor Prata.....	74
Tabela 12 –	Dados de pitometria da EEAB-1, Tramo Sul.....	75
Tabela 13 –	Dados de pitometria da EEAB-2, Tramo Sul.....	76
Tabela 14 –	Dados de pitometria da EEAB-3, Tramo Sul.....	76
Tabela 15 –	Dados de pitometria da EEAB-4, Tramo Sul.....	77
Tabela 16 –	Dados de pitometria da EEAB-5, Tramo Sul.....	77
Tabela 17 –	Vazões determinadas pelo modelo hidráulico e pelo levantamento pitométrico, Tramo Sul.....	77
Tabela 18 –	Dados nominais de projeto da EEAB-8 para Casinhas e Surubim parte alta e baixa.....	78
Tabela 19 –	Dados de pitometria EEAB-8, Tramo Norte.....	79
Tabela 20 –	Comparativo entre as vazões determinadas no modelo e as obtidas com o levantamento pitométrico – Tramo Norte do sistema adutor Jucazinho.....	80
Tabela 21 –	Correlação entre os valores de vazão dos modelos e da pitometria.....	81

Tabela 22 – Cálculo do coeficiente C, trecho 1-2 do sistema Prata, diâmetros nominais 600 e 500.....	84
Tabela 23 – Cálculo do coeficiente C, trecho 2-3 do sistema Prata, diâmetros nominais 600 e 500.....	84
Tabela 24 – Comparativo de vazões determinadas pelo modelo hidráulico e a pitometria para o sistema adutor Prata calculados com os valores de C.....	85
Tabela 25 – Valores de R e R <sup>2</sup> para relação C x Vazão das estações elevatórias.....	89
Tabela 26 – As vinte estações elevatórias da COMPESA com maior custo de energia, março 2021.....	92
Tabela 27 – Resultado para projeção populacional da cidade de Caruaru-PE.....	94
Tabela 28 – Indicadores operacionais de água e seus respectivos valores – Caruaru-PE.....	95
Tabela 29 – Vazões <i>per capita</i> s efetivas e vazões de demanda.....	96
Tabela 30 – Déficits das demandas dos sistemas adutores.....	96
Tabela 31 – Relação entre o índice de perdas e a população atendida.....	98

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO.....</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>19</b>
3.1	OBJETIVO GERAL.....	19
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
<b>4</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>20</b>
4.1	MODELAGEM HIDRÁULICA.....	20
4.2	EPANET.....	27
<b>5</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS.....</b>	<b>34</b>
5.1	SISTEMA ADUTOR DE JUCAZINHO (TRAMOS NORTE E SUL).....	34
<b>5.1.1</b>	<b>Estações elevatórias.....</b>	<b>36</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Adutoras.....</b>	<b>36</b>
5.2	SISTEMA ADUTOR PRATA.....	38
<b>5.2.1</b>	<b>Estações elevatórias.....</b>	<b>40</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Adutoras.....</b>	<b>40</b>
5.3	SISTEMA ADUTOR ALTO CAPIBARIBE.....	41
<b>5.3.1</b>	<b>Estações elevatórias.....</b>	<b>42</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Adutoras.....</b>	<b>43</b>
5.4	SISTEMA ADUTOR SERRO AZUL.....	44
<b>5.4.1</b>	<b>Estações elevatórias.....</b>	<b>45</b>
<b>5.4.2</b>	<b>Adutoras.....</b>	<b>45</b>
<b>6</b>	<b>CONSTRUÇÃO DO MODELO HIDRÁULICO.....</b>	<b>46</b>
6.1	LEVANTAMENTO DOS DADOS.....	46
6.2	CONSTRUÇÃO DOS MODELOS HIDRÁULICOS.....	47
<b>6.2.1</b>	<b>Adutoras.....</b>	<b>49</b>
<b>6.2.2</b>	<b>Reservatórios.....</b>	<b>50</b>
<b>6.2.3</b>	<b>Nós.....</b>	<b>51</b>
<b>6.2.4</b>	<b>Estações elevatórias.....</b>	<b>52</b>
<b>6.2.5</b>	<b>Válvulas.....</b>	<b>54</b>
<b>7</b>	<b>CALIBRAÇÃO.....</b>	<b>56</b>
7.1	ANÁLISE PITOMÉTRICA.....	57

7.2	CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS CONJUNTOS MOTOR-BOMBA.....	57
7.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	58
7.4	COEFICIENTE DE HAZEM-WILLIAMS C.....	60
7.5	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	61
<b>8</b>	<b>ANÁLISE DOS SISTEMAS QUANTO AO ATENDIMENTO DA DEMANDA DE CARUARU.....</b>	<b>63</b>
8.1	ESTUDO DE CASO.....	63
8.2	CONSUMO <i>PER CAPITA</i> .....	65
8.3	ESTUDO DA POPULAÇÃO FUTURA.....	65
8.4	CÁLCULO DA DEMANDA.....	68
<b>9</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>69</b>
9.1	MODELAGEM HIDRÁULICA.....	69
9.2	CALIBRAÇÃO.....	72
<b>9.2.1</b>	<b>Sistema adutor Prata.....</b>	<b>72</b>
<b>9.2.2</b>	<b>Sistema adutor de Jucazinho, Tramo Sul.....</b>	<b>74</b>
<b>9.2.3</b>	<b>Sistema adutor de Jucazinho, Tramo Norte.....</b>	<b>78</b>
<b>9.2.4</b>	<b>Sistema adutor Alto Capibaribe.....</b>	<b>82</b>
<b>9.2.5</b>	<b>Sistema adutor Serro Azul.....</b>	<b>82</b>
9.3	COEFICIENTE DE HAZEM-WILLIAMS C.....	83
9.4	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – RELAÇÃO C X VAZÃO.....	86
9.5	AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE ATENDIMENTO DOS SISTEMAS ADUTORES.....	93
<b>10</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>100</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>102</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com o aumento populacional, desenvolvimento econômico e processo de urbanização, a demanda e o uso da água aumentaram significativamente nas últimas décadas. Segundo a Agência Nacional de Águas – ANA (BRASIL, 2019), a demanda por uso de água no Brasil é crescente, com aumento estimado de aproximadamente 80% no total retirado de água nas últimas duas décadas. A previsão é de que, até 2030, a retirada aumente mais 26%.

Gomes *et al.* (2014) afirmam que esse intenso processo de urbanização tem exigido grandes esforços no âmbito técnico, organizacional e financeiro das empresas de saneamento, principalmente devido ao conseqüente aumento das demandas de água para abastecimento. Com isso os sistemas de abastecimento de água estão cada vez maiores, mais complexos e com mais exigências ao nível da confiabilidade de seu funcionamento.

Conforme o Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto fornecido pelo Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento – SNIS (BRASIL, 2021), o país possuía em 2019 cerca de 662,6 mil quilômetros de redes de distribuição de água, em sua maioria nas áreas urbanas das cidades, que, por sua vez, atende a 160,7 milhões de habitantes. Os principais problemas dessas redes estão relacionados com o desgaste e a operação com demanda para a qual não foram projetadas, contribuindo assim para a conclusão feita por Brentan (2014), de que as empresas de saneamento têm dificuldades em conciliar o crescimento urbano com o abastecimento de água seguro e eficiente.

Portanto, um dos desafios que se apresenta hoje para o saneamento é a adoção de tecnologias e práticas para o uso racional dos recursos hídricos e controle de perdas em sistemas de abastecimento. O atendimento a esses requisitos proporcionará uma maior eficiência e eficácia dos sistemas de abastecimento de água, garantindo, conseqüentemente, o direito social à água (BRASIL, 2007).

Desta maneira, é fundamental para as concessionárias de água do país o desenvolvimento de ferramentas, estratégias e uso de tecnologias direcionadas para a gestão eficiente dos sistemas existentes, que podem ser utilizadas em avaliações, a partir de modelos hidráulicos, dos sistemas de abastecimento de água. Conforme Ormsbee (2006), o desenvolvimento de *softwares* comerciais, para dimensionamento e análise de sistemas de abastecimento de água, teve início no final da década de 60 e início da década de 70. O uso destes modelos computacionais possibilitou que as simulações hidráulicas dos sistemas hidráulicos ficassem mais assertivas, rápidas e confiáveis.

Nos últimos anos surgiram ferramentas computacionais que vêm sendo aplicadas, cada vez mais, para representarem os sistemas físicos e auxiliarem nas tomadas de decisão com o propósito de melhorar a eficiência da operação (GOMES, 2009). Essas ferramentas auxiliam nas estratégias e decisões a serem tomadas, pois permite ao profissional simular diversas situações operacionais de modo que possa resultar na melhor tomada decisão e, conseqüentemente, melhora a qualidade do serviço, não onerando o sistema nem os consumidores.

A modelagem representa um modelo realista do sistema físico existente e possibilita realizar uma avaliação do comportamento hidráulico, encontrar diversas soluções aos problemas encontrados, tudo isso sem precisar fazer testes no sistema real. Ou seja, a modelagem torna a avaliação dos sistemas mais econômica e tecnicamente viável.

Silva (2016) afirma que a modelagem de sistemas de abastecimento de água é, hoje em dia, a forma mais exata e econômica de simular o comportamento de um sistema físico real, já que permite resolver, de forma rápida, um conjunto de sistemas de equações de continuidade e de conservação de energia, utilizadas na formulação das condições de equilíbrio de redes de distribuição. Este processo seria extremamente complexo e oneroso tanto do ponto de vista temporal como econômico para a companhia caso fosse feito manualmente.

De acordo com Kara *et al.* (2016), modelos hidráulicos são eficientes ferramentas de apoio à decisão para o desenvolvimento de vários cenários de gerenciamento, melhorar a eficiência e a confiabilidade das redes existentes e projetar novos sistemas. Segundo Silva (2014), o uso de simuladores hidráulicos apresenta-se como alternativa insubstituível nos sistemas de apoio à gestão em curto prazo, além de possibilitarem o planejamento de longo prazo direcionado para o controle de perdas e para a programação da reabilitação de redes de distribuição de água. O uso destes simuladores também poderá fornecer estudos de combate a incêndio, suporte a setorização, operação e expansão do sistema, otimização dos conjuntos elevatórios, estudo de demanda (sazonalidade) e controle da qualidade de água. Lima (2008) afirma que o correto desenvolvimento do modelo propicia melhorias na qualidade geral da informação disponível sobre os sistemas no conhecimento da infraestrutura e na articulação dos diversos setores técnicos das empresas.

Portanto, a utilização de um modelo hidráulico é imprescindível para facilitar as análises técnicas necessárias e faz com que a tomada de decisão seja mais rápida e

assertiva. Assim, a gestão dos sistemas de abastecimento fica mais otimizada, segura, menos onerosa e eficiente.

Nos últimos anos, diversos estudos direcionados à modelagem de sistemas de distribuição de água estão sendo publicados nos principais periódicos do mundo (por exemplo, GIUSTOLISI, 2016; KARA *et al.*, 2016; AGUNWAMBA *et al.*, 2018; CHATZIVASILI *et al.*, 2019; BERREZAL *et al.*, 2022; MABROK *et al.*, 2022; MEKONNEN, 2022).

No mercado existem alguns *softwares* de simulação hidráulica como, por exemplo, *Hidrocad*, *Watercad*, *Strumap*, *SynerGee*, *INSSA*. De acordo com Biscos *et al.* (2003) a maioria dos sistemas de distribuição de água existentes no mundo estão sendo modelados no EPANET que é um *software* desenvolvido pela *Environmental Protection Agency*, dos Estados Unidos, esse *software* vem se destacando exponencialmente por ter uma distribuição gratuita e devido à facilidade de uso. Permite executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade de água de um sistema de distribuição (ROSSMAN, 2009). É um *software* gratuito, de domínio público, compatível com outras ferramentas computacionais e amplamente aceito pela comunidade internacional.

O presente trabalho é fruto do convênio firmado entre a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e a Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA) – Contrato N° CT.PS.20.7.048, no âmbito do PSA Ipojuca, projeto financiado pelo Banco Interamericano de Desenvolvimento. O objetivo principal do projeto foi o desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão para a operação integrada dos sistemas adutores que abastecerão as cidades do Agreste Pernambuco. A Fade-UFPE (Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da UFPE) foi a instituição contratada para o desenvolvimento do projeto de pesquisa e inovação, atuando na gestão administrativa e financeira.

Essa pesquisa originou-se do desenvolvimento do Produto 8 – Análise e Modelagem dos Sistemas Adutores considerando a Integração de Múltiplas Fontes Hídricas, do referido convênio, que teve como objetivo a modelagem hidráulica e calibração dos sistemas adutores, que subsidiou a determinação dos valores de vazões dos sistemas e as diversas condições operacionais adotadas no processo de otimização do sistema de suporte à decisão.

## 2 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

Os baixos índices de precipitação, a irregularidade de seu regime, temperaturas elevadas durante todo o ano, a baixa capacidade de armazenamento de água no solo, grande concentração de pessoas na região, poucas opções de mananciais locais, água prejudicada pela salinidade dos solos e pela carga de esgotos que os rios recebem e ainda as altas taxas de evaporação, contribuem para os reduzidos valores de disponibilidade hídrica observados no Nordeste brasileiro, que possui 88% do seu território no semiárido.

O agreste de Pernambuco registra o pior balanço hídrico de Pernambuco e o estado, por sua vez, o mais desfavorável do Brasil. Segundo Cirilo (2008), a disponibilidade hídrica per capita de Pernambuco é da ordem de 1300 m<sup>3</sup>/hab./ano, ao passo que no Agreste do estado esse valor é cerca de 800 m<sup>3</sup>/hab./ano.

Devido à variação climática dos últimos anos, o que causou escassez de chuvas em várias partes do país, a sociedade tem enfrentado um grande problema quanto à disponibilidade nos recursos hídricos. Aliado a esse fator, o crescimento populacional contribuiu para o aumento do consumo de água, o que tem levado os sistemas de abastecimento a trabalhar em situações extremas. Um grande exemplo disso é a barragem de Jucazinho, localizado no estado de Pernambuco, que no ano de 2015 entrou no seu volume morto até finalmente, em 2016, chegar em seu colapso declarado pela Companhia Pernambucana de Saneamento.

Os esforços para o melhor aproveitamento dos recursos hídricos, em regiões como o Agreste Pernambucano, em que os mananciais disponíveis não oferecem garantias para o abastecimento de água à população, requer gestão, visão e planejamento estratégico e o fortalecimento da infraestrutura hídrica (CIRILO, 2015).

Neste cenário, a modelagem hidráulica surge como uma ótima e importante ferramenta, pois permite estudos de efficientização, expansão e adequação ao crescimento populacional dos sistemas adutores e um conjunto de informações necessárias para auxiliar os gestores nas tomadas de decisão para que se tenha uma garantia de fornecimento de água em quantidade e qualidade suficiente para o atendimento da demanda da população.

Os modelos computacionais de simulação hidráulica de sistemas adutores são ferramentas que têm como objetivo reproduzir, por meio de um modelo computacional e com a maior exatidão possível, o comportamento real de sistemas físicos que representam. Esses modelos podem ser utilizados em diversas situações em que seja

necessário efetuar simulações de sistemas adutores, como por exemplo, expansão e adequação de uma adutora existente.

Deste modo, considerando que a região Nordeste, mais precisamente, o Agreste Pernambucano, é uma das regiões com piores índices pluviométricos, a simulação hidráulica é indispensável para o controle eficiente de sistemas hidráulicos visto que consiste em um instrumento com um vasto domínio de aplicabilidade para as companhias de saneamento e que poderá ser utilizada no planejamento, projeto, operação, manutenção e reabilitação dos sistemas adutores existentes.

Portanto, o uso da modelagem hidráulica trará mais segurança e assertividade no uso da água para o atendimento à população.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GERAL**

O presente estudo tem como objetivo geral a avaliação dos sistemas produtores de água que abastecem o agreste pernambucano por meio de modelagem hidráulica.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Construir um modelo hidráulico dos sistemas adutores de Jucazinho e do Prata, Alto do Capibaribe e Serro Azul;
- Analisar o comportamento hidráulico dos sistemas adutores de Jucazinho e do Prata, Alto do Capibaribe e Serro Azul;
- Analisar a capacidade de atendimento dos sistemas adutores Prata e Jucazinho no fornecimento de água para a cidade de Caruaru-PE.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item são abordados assuntos acerca do tema estudado para uma maior compreensão da pesquisa. O primeiro assunto a ser comentado é a modelagem hidráulica, destacando as vantagens e importância, até chegarmos à seção seguinte que faz referência ao *software* utilizado na pesquisa: EPANET. Aqui será mostrado o quanto o *software* é usado em estudos de modelagem, mas também como este é adotado junto a modelagem para outros objetivos como setorização, gerenciamento da pressão, perda de água e eficiência energética.

### 4.1 MODELAGEM HIDRÁULICA

A modelagem hidráulica é indispensável para o controle eficiente de sistemas hidráulicos complexos, adequação de sistemas já existentes, planejamento de novos sistemas e constitui um instrumento com um vasto domínio de aplicabilidade para as concessionárias de água podendo ser utilizada para planejamento, projeto, operação, manutenção e reabilitação dos sistemas adutores.

Conforme Kara *et al.* (2016), modelos hidráulicos são eficientes ferramentas de apoio à decisão para o gerenciamento eficaz de sistemas de abastecimento de água. Também servem para atestar a eficiência, confiabilidade e desempenho de novos e já existentes sistemas (AGUNWAMBA, EKWULE e NNAJI, 2018).

A partir da modelagem é possível realizar uma avaliação dos comportamentos hidráulicos existentes, testar diversas soluções para os problemas encontrados e até avaliar os resultados sem a necessidade de recorrer às experiências realizadas num sistema real. Portanto, a modelagem torna o processo de concepção e gestão dos sistemas de abastecimento num exercício bem mais eficiente.

A própria NBR 12218 (ABNT, 2017) – Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público – após a sua revisão no ano 2017, traz, no item 4.1.3, as atividades necessárias ao desenvolvimento do projeto que são necessárias realizações de simulações hidráulicas, considerando os principais cenários, com calibração e validação dos sistemas.

Os *softwares* de simulação hidráulica resolvem as equações de continuidade e energia com base nos dados de entrada fornecidos. Conforme Kara *et al.* (2016), o sucesso do modelo depende da determinação precisa dos parâmetros de entrada e calibração do

modelo. Giustolisi (2016) afirma que uma modelagem realista é obrigatória para projetar soluções técnicas eficazes considerando o comportamento real dos sistemas de abastecimento.

Algumas fontes de incertezas devem ser analisadas de maneira que possa tornar o modelo o mais próximo possível da realidade. Algumas dessas fontes são: características e estados de conservação dos tubos, diâmetros internos e rugosidades, solicitações ao sistema, consumos (valor e padrão), topologia do sistema, ligações e estados das válvulas (abertas, parcialmente abertas e fechadas).

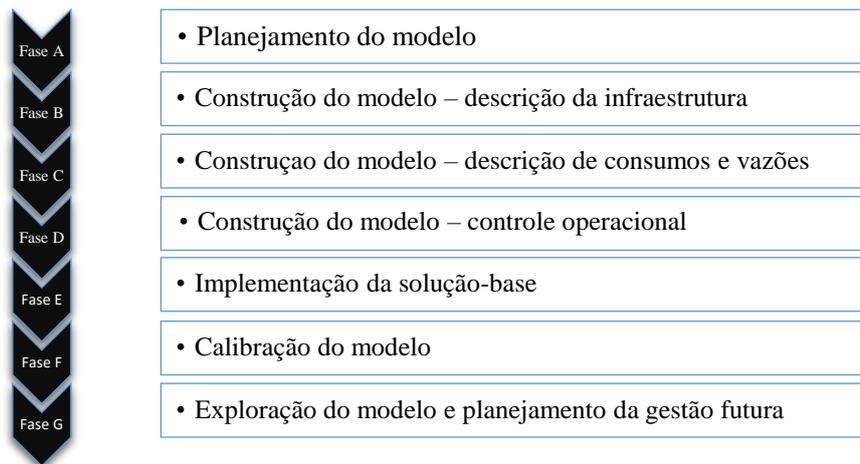
Silva (2014) define os modelos hidráulicos de duas formas distintas em que a primeira é o *software* de cálculo (simulador) que descreve o comportamento do sistema mediante determinadas solicitações e a segunda associa os modelos ao conjunto de componentes físicos e não físicos que descrevem o comportamento hidráulico e de qualidade da água do sistema.

Coelho, Loureiro e Alegre (2006) afirmam que os modelos de simulação hidráulica são formados por:

- Um conjunto de dados descritivos das características físicas dos sistemas, das suas solicitações – consumos – e de suas condições operacionais;
- Um conjunto de equações matemáticas que reproduzem o comportamento hidráulico dos componentes individuais e do sistema como um todo, expressas em termos das principais variáveis de estado, por exemplo, a vazão nos trechos ou a pressão nos pontos de consumo;
- Por algoritmos numéricos necessários para a resolução desse conjunto de equações matemáticas.

Coelho, Loureiro e Alegre (2006) também mostram a importância do desenvolvimento do modelo que deve ser feito de forma estruturada e sistemática de modo a garantir o melhor aproveitamento possível dos esforços e recursos investidos. De acordo com os autores o desenvolvimento do modelo deverá seguir a seguinte metodologia mostrada na Figura 1.

Figura 1 – Fases do desenvolvimento do modelo hidráulico.

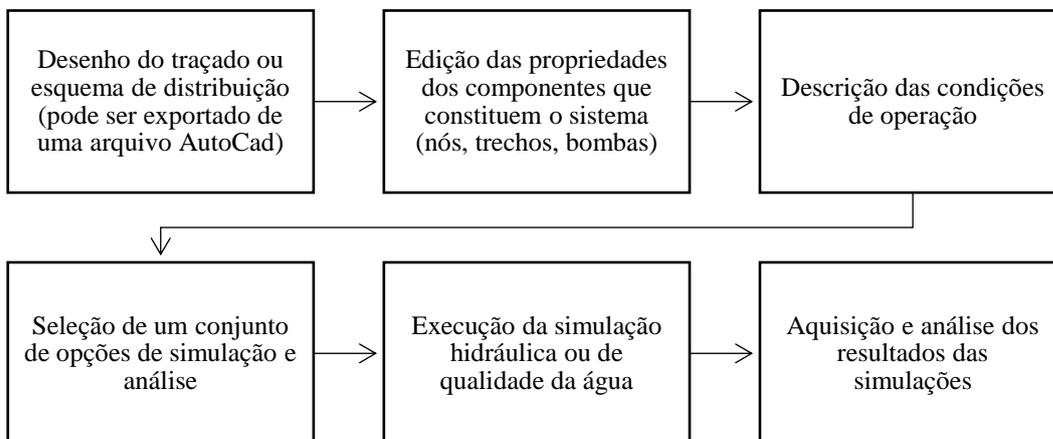


Fonte: O Autor (2022).

Nota: Adaptado de Coelho, Loureiro e Alegre (2006).

Segundo Gomes (2019), a modelagem de um sistema pode ser resumidamente representada por meio da metodologia apresentada na Figura 2.

Figura 2 – Metodologia para modelagem hidráulica.

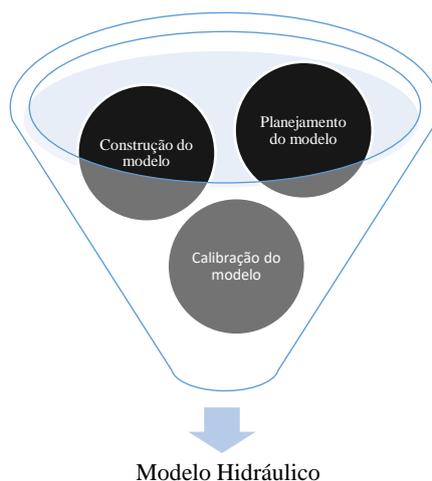


Fonte: O Autor (2022).

Nota: Adaptado de Gomes (2019).

Portanto, de forma resumida, na Figura 3, pode-se dizer que um modelo hidráulico pode ser obtido a partir de três etapas.

Figura 3 – Etapas para obtenção de um modelo hidráulico.



Fonte: O Autor (2022).

Há diversos simuladores hidráulicos disponíveis para a modelagem de sistemas de distribuição de água como, por exemplo, HIDROCAD, EPANET, WATERCAD, WATERGEMS, WATDIS, STRUMAP, SYNERGEE, INSSA. Vale mencionar que a seleção do simulador hidráulico deve ser feita de acordo com o objetivo a que se quer chegar, porque todos têm suas vantagens e desvantagens. No Quadro 1, é apresentado um conjunto de informações sobre algumas características que devem ser consideradas na escolha do simulador hidráulico conforme Rego (2007).

Quadro 1 – Características dos modelos de simulação hidráulica.

Características	Simuladores Hidráulicos				
	HIDROCAD	EPANET	WATERCAD	STRUMAP	SYNERGEE
Custo	Bom	Muito bom	Não satisfaz	Não satisfaz	Não satisfaz
Facilidade de uso	Muito bom	Muito bom	Bom	Bom	Não satisfaz
Operacionalidade e flexibilidade	Não satisfaz	Bom	Bom	Muito bom	Bom
Robustez do modelo	Não satisfaz	Bom	Bom	Bom	Muito bom
Velocidade de processamento	Não satisfaz	Bom	Muito bom	Muito bom	Muito bom
Componentes representadas	Não satisfaz	Muito bom	Muito bom	Bom	Muito bom
Interface com o usuário	Bom	Muito bom	Bom	Bom	Não satisfaz
Características do modelo de qualidade	Não satisfaz	Bom	Muito bom	Não satisfaz	Não satisfaz
Integração com bases de dados de CAD, SIG e SCADA	Bom	Bom	Muito bom	Bom	Bom

Fonte: O Autor (2022).

Nota: Adaptado de Rego (2007).

Diante do exposto, pode-se notar que a modelagem pode ser utilizada para vários objetivos. No Quadro 2 estão expostos, em rol não exaustivo, alguns dos objetivos buscados e alcançados com o uso da modelagem.

Quadro 2 – Objetivos do uso da modelagem.

<b>Tipo de Modelo</b>	<b>Objetivos</b>
Modelos de apoio ao projeto – Dimensionamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diâmetro dos tubos</li> <li>- Capacidade de reservatórios</li> <li>- Dimensionamento de estações elevatórias</li> </ul>
Modelos de apoio à operação – Controle operacional da rede	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Apoiar a programação de ações de manutenção</li> <li>- Testes off-line ao funcionamento normal (diferentes cenários)</li> <li>- Verificação da resposta da rede em situações de emergência</li> <li>- Análise do impacto da avaria de um elemento da rede</li> </ul>
Modelos de apoio à manutenção	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Apoiar à programação de ações e manutenção</li> <li>- Definição das fronteiras dos distritos de medição e controle (DMC) permanentes e temporários</li> </ul>
Modelos de apoio ao planejamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identificação de áreas problemáticas</li> <li>- Dimensionamento e análise do impacto de novos trechos, bombas, reservatórios na rede existente</li> <li>- Previsão do comportamento do sistema no longo prazo – face a uma determinada evolução dos consumos</li> <li>- Programação de intervenções de reabilitação – minimização de impactos</li> <li>- Gerenciamento de longo prazo – planejamento de novas fontes de abastecimento e ampliações do sistema</li> </ul>
Modelos de apoio à operação – Gestão de energia	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Minimização de custos energéticos e da energia consumida</li> <li>- Otimização da relação entre o volume de água armazenado nos reservatórios e as horas de bombeamento</li> </ul>
Modelos de apoio à operação – Controle da qualidade da água	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Análise do decaimento de desinfectantes (cloro)</li> <li>- Planejamento de campanhas de amostragem</li> <li>- Recloração ao longo da rede</li> </ul>
Modelos de apoio à operação – Avaliação e controle de perdas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Setorização de redes (definição de DMC)</li> <li>- Gestão das pressões (níveis de pressão, posição de válvulas, etc.)</li> </ul>

Fonte: O Autor (2022).

Samir *et al.* (2017) utilizaram o *software* WaterCad para modelagem da rede de distribuição de Arama, Alexandria, Egito, visando à redução da perda de água por meio do uso de válvulas redutoras de pressão (VRP). O estudo foi dividido em 6 cenários. O cenário zero (base) foi modelado, mas sem nenhuma VRP, servindo como cenário base, neste caso, o volume perdido de água foi de 230 m<sup>3</sup>/dia e as pressões máximas e mínimas foram de 29,935 metros e 29,923 metros. Nos cenários de 1 a 3 e de 4 a 5 foram instaladas 2 e 3 VRPs, respectivamente, mas em tubulações distintas. Destes, o cenário com melhor desempenho foi o primeiro em que a pressão média caiu para cerca de 19,995 metros e a

redução do vazamento de água foi de 142 m<sup>3</sup>/dia que caracteriza uma redução de 37%. O segundo, terceiro e quinto cenários não foram eficientes, resultando em uma redução insignificante. No quarto cenário a redução de vazamento foi de 146 m<sup>3</sup>/dia, mas a pressão ficou um pouco maior que o primeiro cenário.

Ramana e Chekka (2018) utilizaram o *software* EPANET para modelagem da rede de abastecimento de água na cidade de Dire Dawa, Etiópia, para observar o funcionamento da rede e sua eficiência para o ano de 2027, partindo do ano base 2017. Usaram como dados de entrada para calibração do modelo: população (modelo geométrico), para o cálculo das demandas e incrementaram mais 10% para demandas de emergência e incêndio; comprimento, rugosidade, diâmetro das tubulações; e elevação dos nós. Pelos resultados obtidos após a calibração do modelo notou-se que o erro obtido para pressão e demanda entre o valor real e o calculado pelo *software* está dentro dos limites. Todos os parâmetros hidráulicos foram encontrados dentro dos limites especificados. Isso mostra que a modelagem é válida. Além disso foram propostos 2 reservatórios com capacidade de 2,7 milhões de metros cúbicos para atender populações futuras e com elevação necessária para garantir que a água flua em todas as tubulações de forma eficiente.

Birsi, Sisingih e Putra (2018) utilizaram o WaterCad para verificar as condições de eficiência da rede de abastecimento Kedungkandang, localizada na cidade de Malang, Indonésia, para um horizonte de projeto de 20 anos (2011-2031). Com base no estudo para uma população futura de 27.284 habitantes notou-se que a rede em questão conseguirá atender as demandas precisando apenas de alguns ajustes de diâmetros em duas tubulações.

Lousada *et al.* (2019) atentam para o fato que os estudos sobre modelagem devem abordar as competências necessárias para a modelação e a análise de sistemas de abastecimentos de água, ao nível de planejamento e projeto de um sistema novo, bem como ao nível do diagnóstico de sistemas já existentes, visando melhorar sua eficiência, bem como aliá-lo a processos de planejamento urbanístico. Para os autores, a investigação dessa temática poderá conduzir à concepção e à reabilitação de sistemas mais eficientes na forma como distribuem o recurso, proporcionando sistemas mais viáveis em âmbito econômico e social (sustentável).

Martinho *et al.* (2020) afirmam que além da gestão do abastecimento de água, a modelagem hidráulica é uma ferramenta importante para o controle de ativos, planos de

controle operacional para monitorar e melhorar a qualidade da água, definição de áreas de zoneamento e estabelecimento de programas de controle de perda de água.

Nos últimos anos, diversos estudos, que tratam sobre a modelagem de sistemas de distribuição de água, estão sendo publicados nos principais periódicos do mundo, como, por exemplo, Giustolisi (2016), Kara *et al.* (2016), Ramana e Chekka (2018), Patelis, Kanakoudis e Kravvari (2020) e Armendariz (2020). Isso demonstra a importância da modelagem e de um bom planejamento para os sistemas nos dias atuais já que podem mitigar problemas com relação a escassez hídrica e ineficiências hidráulicas/energéticas.

Armendariz (2020) utilizou o EPANET junto com um modelo GIS e AutoCad para construção de modelo hidráulico da rede de abastecimento de água da Comarca de Pamplona (Espanha). Como é uma rede extensa, a autora optou por usar o método da “esqueletização” – divisão da rede – exportando assim para o *software* EPANET apenas as tubulações mais importantes. A rede foi modelada duas operações distintas, de acordo com as estações do ano, inverno e verão. Para o modelo inverno, o erro médio foi de 1,7% na pressão, 2,5% nos níveis dos reservatórios e de 5,3% nas vazões. Para o modelo verão, os erros foram de 2,9%, 3,2% e de 5,2% respectivamente. Os pontos em que se observaram erros são os mesmos nos dois modelos e são devidos aos locais que se encontram em zonas mais complexas da rede. Segundo a autora, mesmo apresentando tais erros, o resultado da modelagem é aceitável.

Patelis, Kanakoudis e Kravvari (2020) utilizaram o *software* WaterCad para modelagem da rede de distribuição da cidade grega Kos, com o intuito de reduzir a idade da água, tempo que a água permanece na tubulação antes de chegar as torneiras dos consumidores. Para isso, usaram válvulas redutoras de pressão para a setorização. O estudo foi dividido em três cenários, em que o primeiro cenário simulado não foi dividido em setores nem foram utilizados VRPs; no segundo cenário, a rede foi dividida, mas não foram utilizadas VRPs; e, por fim, o terceiro cenário considerou a rede setorizada e o uso de VRPs. Ao analisar os resultados observaram que à medida que conseguiam diminuir a pressão nos setores com o uso das VRPs, que era um objetivo a ser alcançado, a idade da água aumentava. A explicação para este fato é que com a pressão mais baixa, a demanda e a perda de água ficavam menor, por isso a água ficava mais tempo nas tubulações. Para ajustar esse equilíbrio entre pressão e idade da água, foram colocadas VRPs a jusante dos setores. Desta forma, a rede foi dividida em quatro setores em que foi verificado uma redução da idade da água entre 4% e 10%. Essa redução foi associada a um aumento na pressão que variou apenas de 1% a 4%.

Neste estudo optou-se pelo uso do *software* EPANET 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.

## 4.2 EPANET

A sigla EPANET, que dá nome ao *software*, surge da contração do nome da agência que o desenvolveu, *Environmental Protection Agency*, mais a palavra NET (em português, rede), e foi desenvolvido por Lewis A. Rossman. Este permite executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade da água em redes de distribuição pressurizada. Permite obter os valores de vazão em cada tubulação, da pressão em cada nó, da altura de água em cada reservatório de nível variável e da concentração de espécies químicas através da rede durante o período de simulação.

Conforme Rossman (2009), o EPANET contém um conjunto de ferramentas de cálculo para apoio à simulação hidráulica os quais destacam-se:

- Dimensão ilimitada do número de componentes da rede analisada;
- Cálculo da perda de carga utilizando as fórmulas de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach, ou Chezy-Manning;
- Consideração de perdas de cargas equivalentes;
- Modelagem de bombas de velocidade constante ou variável;
- Cálculo da energia de bombeamento e do respectivo custo;
- Modelagem dos principais tipos de válvulas e reservatórios de nível variável.

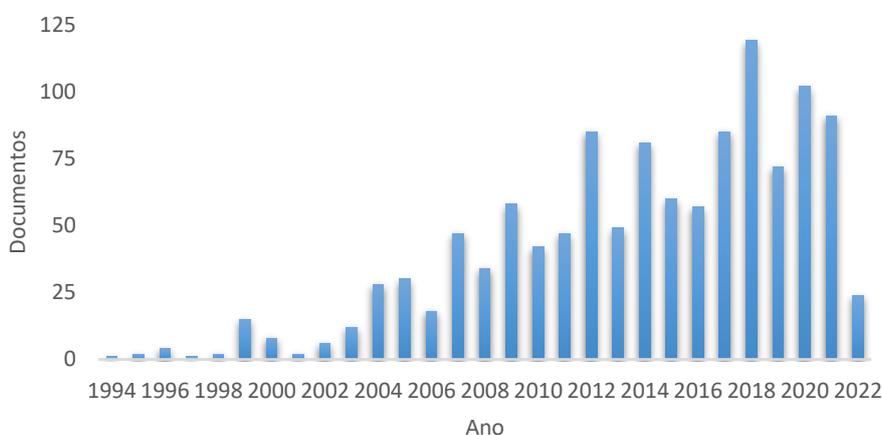
Silva (2008), visando mostrar as potencialidades do EPANET 2.0 para a simulação hidráulica de sistemas de abastecimento de água, mostra que o programa tem a capacidade de interação com diversos pacotes computacionais gratuitos, permitindo analisar e simular várias situações reais poder meio da:

- Importação de redes desenhadas em AutoCAD;
- Análise da qualidade da água (idade, cloro residual, etc.);
- Modelagem do funcionamento de válvulas e bombas;
- Análise das condições de combate a incêndio.

Sabe-se que o EPANET é usado para diversos fins, como, por exemplo, setorização, gerenciamento de pressão, eficiência energética. Neste contexto, na plataforma de pesquisa SCOPUS tem-se uma ideia do quanto o *software* vem sendo utilizado. Ao se pesquisar a palavra EPANET como título do artigo, resumo e palavra-chave, a plataforma mostra os resultados encontrados em ordem decrescente de publicações anuais. A própria plataforma, por meio das análises de resultados da pesquisa, *analyze search result*, mostra os mesmos resultados encontrados em forma de gráfico, Gráfico 1, no qual é possível observar a quantidade de documentos registrados por ano.

Os documentos a que se refere o Gráfico 1 podem ser divididos em artigos, capítulos de livro, trabalhos apresentados em conferências e editoriais. Mas em sua grande maioria são artigos e trabalhos apresentados em conferências. Os estudos datam a partir do ano de 1994 contendo um único estudo registrado a época. Nota-se o crescente número de estudos que, de alguma forma, envolveram o *software* chegando ao seu pico, até o momento, no ano de 2018 com um total de 119 documentos registrados na plataforma.

Gráfico 1 – Número de estudos, por ano, que adotaram o *software* EPANET de acordo com a plataforma SCOPUS. Data: 10/04/2022.



Fonte: O Autor (2022).

Nota: Adaptado da Plataforma Scopus.

No Quadro 3, estão listados, em rol exemplificativo, artigos que usaram o EPANET para vários fins. Grande parte desses documentos estão no banco de dados da plataforma de pesquisa SCOPUS. A intenção, na confecção da tabela em questão, é a de mostrar que o uso do *software* pode ser utilizado para vários objetivos. A tabela foi

montada de acordo com as áreas de pesquisa. Para a montagem foram usadas as seguintes palavras-chaves:

- EPANET *and pressure management*;
- EPANET *and leakage reduction*;
- EPANET *and hydraulic modelling*;
- EPANET *and sectorization*;
- EPANET *and district metered area (DMA)*;
- EPANET *and energy efficiency*.

A seguir, são apresentadas pesquisas relativas à modelagem hidráulica com o auxílio do *software*. Diante de todas as vantagens e potencialidades apresentadas, destaca-se que a maioria dos sistemas de distribuição de água existentes no mundo está sendo modelada no EPANET. Seu número de usuários aumenta exponencialmente devido a sua facilidade de uso e por ser um programa disponibilizado gratuitamente.

A versão do *software* EPANET traduzida para o português, falado e escrito no Brasil, é uma iniciativa do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS UFPB), pertencente ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

Quadro 3 – Artigos em periódicos que adotaram a modelagem hidráulica em suas metodologias.

	<b>Autor/Ano/ Local</b>	<b>Título</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Software/ Método</b>	<b>Resultados</b>
<b>Modelagem e gerenciamento de pressão</b>	Anisha <i>et al.</i> , 2016 Rede fictícia	Analysis and design of water distribution network using EPANET	Avaliar a eficiência e a confiabilidade da rede existente para os próximos 25 anos	EPANET MATLAB	Analisando a rede e suas demandas considerando escolas, hospitais e a projeção da população futura, chegaram à conclusão de que a rede não conseguirá atender aos requisitos de eficiência e confiabilidade
	Kara <i>et al.</i> , 2016 Turquia	Hydraulic modeling of a water distribution network in a tourism area with highly varying characteristics	Comparar os valores de pressão obtidos na modelagem com os observados no sistema real	EPANET	Por meio da modelagem pôde ser verificado que a pressão existente em alguns pontos variava entre 30 a 70 metros, o que excedia a pressão permitida pela legislação do país
	Agunwamba, Ekwule e Nnaji, 2018 Nigéria	Performance evaluation of a municipal water distribution system using WaterCad and Epanet	Avaliar o desempenho hidráulico da rede por meio da pressão, vazão e velocidade	EPANET WaterCad	Observaram que a rede em estudo possuía algumas tubulações subdimensionadas e que as VRPs estavam instaladas em lugares incorretos, fazendo com que se tivesse uma má gestão da pressão e conseqüentemente a rede é ineficiente
	Lousada <i>et al.</i> , 2019 Portugal	Modelação de sistemas de abastecimento de água. O caso da ilha da Madeira	Diminuir a pressão encontrada na operação do sistema estudado	EPANET	Conseguiram diminuir a pressão na modelagem do sistema de abastecimento de água da Câmara dos Lobos, Ilha da Madeira, por meio do uso de VRPs
	Rajakumar, Cornelio e Kumar, 2020 Índia	Leak management in district metered areas with internal-pressure reducing valves	Analisar o gerenciamento da pressão por meio de VRPs	EPANET MATLAB	Ao invés de colocarem apenas uma válvula na entrada dos setores, colocaram algumas válvulas internas a essa zona. Os resultados foram melhores que a utilização de válvulas nas entradas das zonas. Além disso, conseguiram obter uma redução do volume de água de 24% para 18%. Enquanto que utilizando apenas uma válvula essa redução era de 24% para 22%.

<b>Modelagem e redução de perda de água / localização de vazamentos</b>	Jafari-ASL, Kashkooli, Bahrami. 2018 Rede fictícia	Optimal pressure control for leakage minimization in water distribution networks	Diminuir o volume de vazamento de água por meio da localização ideal de VRPs	EPANET MATLAB – algoritmo cultural (CA)	Com a localização ideal das VRPs atingiram um melhor gerenciamento da pressão e com isso conseguiram reduzir as perdas em 10%
	Jafari-ASL, Kashkooli, Bahrami. 2020 Rede fictícia	Using particle swarm optimization algorithm to optimally locating and controlling of pressure reducing valves for leakage minimization in water distribution systems	Reduzir o volume de água perdido	EPANET MATLAB – PSO	Com a otimização e locação ideal das VRPs, conseguiram reduzir a taxa média de vazamento em 23%. Em comparação com outros algoritmos, GA, ABC e CA, o modelo proposto reduziu o volume em 1,62; 3,45 e 8,53% respectivamente
	Bosco <i>et al.</i> , 2020 Itália	Application of rehabilitation and active pressure control strategies for leakage reduction in a case-study network	Reduzir os vazamentos a partir de medidas de reabilitação e controle de pressão	EPANET MATLAB	O estudo foi dividido em 3 cenários. 1º apenas reabilitação das tubulações com vazamentos; 2º controle de pressão e 3º controle remoto de pressão em tempo real. Apenas o 1º cenário conseguiu uma redução de 16,7% nos vazamentos. Combinando o 1º com o 2º, a redução foi de 35%. 1º e 3º a redução chegou a 37,5%
	Dini e Asadi, 2020 Irã	Optimal operation scheduling of available partially closed valves for pressure management in water distribution networks	Redução do volume de água perdido por meio do funcionamento ideal da programação de válvulas parcialmente fechadas	EPANET MATLAB – ACO e PSO	O PSO foi utilizado para identificar as válvulas que precisariam de ajustes e o ACO para configurar as válvulas. O método proposto resultou em uma redução média de 31,7% nos vazamentos

<b>Modelagem e Setorização para gerenciamento de pressão e redução do volume de água perdido</b>	Chondronasios <i>et al.</i> , 2017 Rede fictícia	Optimizing DMAs formation in a water pipe network. The water aging the operation pressure factors	Reduzir a pressão e o volume de água perdido a partir da setorização	EPANET MATLAB	O estudo foi dividido em três cenários em que cada um tinha uma quantidade de tubulações fechadas. O 1º consideraram 7 tubulações fechadas o que resultou em 4 DMCs. 2º e 3º com 8 e 9 tubulações fechadas resultaram em 5 DMCs. O 1º e o 2º cenário conseguiram uma redução de 25,07% no volume perdido. O 3º, 24,89%
	Gonelas <i>et al.</i> , 2017 Grécia	Forming DMAs in a water distribution network considering the operating pressure and the chlorine residual concentration as the design parameters	Divisão do sistema em DMCs levando em consideração redução da pressão e da concentração de cloro residual	EPANET MATLAB – C++	A combinação otimizada mostrou que o melhor resultado acontecia quando 4 tubulações eram fechadas, com isso a redução da pressão foi de 40,97 KPa para 35,465 KPa, além de não ter pressões negativas nem abaixo da mínima. Com esta solução a rede ficou com 4 DMCs. Os resultados em relação ao cloro não diferiram muito dos apresentados
	Zhang <i>et al.</i> , 2018 China	A practical multi-objective optimization sectorization method for water distribution network	Setorizar a rede de distribuição visando um melhor gerenciamento da pressão	EPANET NSGA-II	Utilizando a teoria dos grafos para setorização visando reduzir a pressão. Conseguiu uma diminuição global de 1,35 metros. Porém em pontos isolados esse valor foi maior. Observou que ao aumentar os setores, melhora o gerenciamento da pressão
	Sophocleous, Savic e Kapelan, 2019 Reino Unido	Leak localization in a real water distribution network based on search-space reduction	Reduzir a área de investigação do vazamento	EPANET MATLAB	O método propõe a redução da área a ser investigada a fim de se encontrar o local de vazamento. Os resultados na rede estudada mostraram que o método reduziu em 10% a área a ser investigada
	Chatzivasili, Papadimitriou e Kanakoudis, 2019 Grécia	Optimizing the formation of DMAs in a water distribution network through advanced modeling	Reduzir a idade da água, pressão e o uso de VRPs	EPANET MATLAB	Utilizaram três algoritmos, GMM, SMM e algoritmos genéticos, na rede de Kozani (Grécia). Conseguiram reduzir a idade da água em 7,3%, a pressão em 46,0%. Também conseguiram uma otimização no uso das VRPs reduzindo-as a metade

<b>Modelagem e eficiência energética</b>	Mambretti e Orsi, 2016 Itália	Optimizing pump operations in water supply networks through genetic algorithms	Analisar a diferença do consumo de energia entre bombas com velocidade fixa e variáveis	EPANET Algoritmo Genético	Os resultados mostraram que após a otimização a redução do consumo de energia das bombas que funcionam com velocidade variável é maior que as de velocidade fixa. As de velocidade variável conseguiram uma redução média de 30,2% e as da fixa, 18,9%
	Darweesh, 2017 Rede fictícia	Assessing of variable speed pumps in water distribution systems considering water leakage and transient operations	Analisar a diferença do consumo de energia entre bombas com velocidade fixa e variáveis	EPANET	Verificou que poderia reduzir a velocidade em até 80% nos horários de menor demanda. Conseguiu reduzir os custos e o consumo de energia em 20% e a redução de vazamentos em 21%
	Brentan <i>et al.</i> , 2018 Rede fictícia	Joint operation of pressure-reducing valves and pumps for improving the efficiency of water distribution systems	Redução no consumo de energia utilizando VRPs e bombas com velocidades variáveis	EPANET PSO	Ao comparar o modelo proposto com o modelo não otimizado, bom com velocidades nominais e válvulas abertas, os resultados mostraram uma redução de 42,5% no consumo de energia
	Sperlich <i>et al.</i> , 2018 Alemanha	Energy efficiency operation of variable speed submersible pumps: simulation of a ground water well field	Redução do consumo de energia elétrica utilizando bombas com velocidades variáveis	EPANET Visual Basic (Excel) – Algoritmo Genético	Os resultados mostraram que o controle de velocidade das bombas pode reduzir o consumo de energia. Esta redução varia de 20% a 30% quando comparado ao consumo de bombas com velocidades nominais
	Luna <i>et al.</i> , 2019 Portugal	Improving energy efficiency in water supply systems with pump scheduling optimization	Otimização dos funcionamentos das bombas visando redução de custo e redução de CO <sub>2</sub>	EPANET PYTHON – Algoritmos Genéticos Híbridos	Os resultados mostraram uma redução total do custo de energia em 10% em relação a operação real do sistema e de 10% por dia em relação ao consumo de energia e emissão de CO <sub>2</sub>
	Santos, Coutinho e Soares, 2020 Rede fictícia	Multiobjective optimization of the operation of water distribution systems with variable speed pumps	Maximizar a confiabilidade hidráulica e diminuir gastos com energia elétrica	EPANET – NSGA-II	Utilizaram a otimização na operação das bombas com velocidades variáveis e de acordo com as soluções (frente de pareto) e as penalidades aplicadas, chegaram a custos menores considerando tarifas brasileiras

Fonte: O Autor (2022).

## 5 CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS

O estado de Pernambuco apresenta o balanço hídrico mais desfavorável do país e o agreste pernambucano possui o pior desempenho de todo o estado (CIRILO, 2008). De acordo com a COMPESA (2015, *apud* RAMOS; 2017), os sistemas de abastecimento de água existentes em Pernambuco são compostos por aproximadamente 200 barragens de acumulação, 250 poços profundos e 4.500 quilômetros de adutoras, sendo que no caso da região agreste há cerca de 60 barragens e nenhum poço para abastecimento de água urbano.

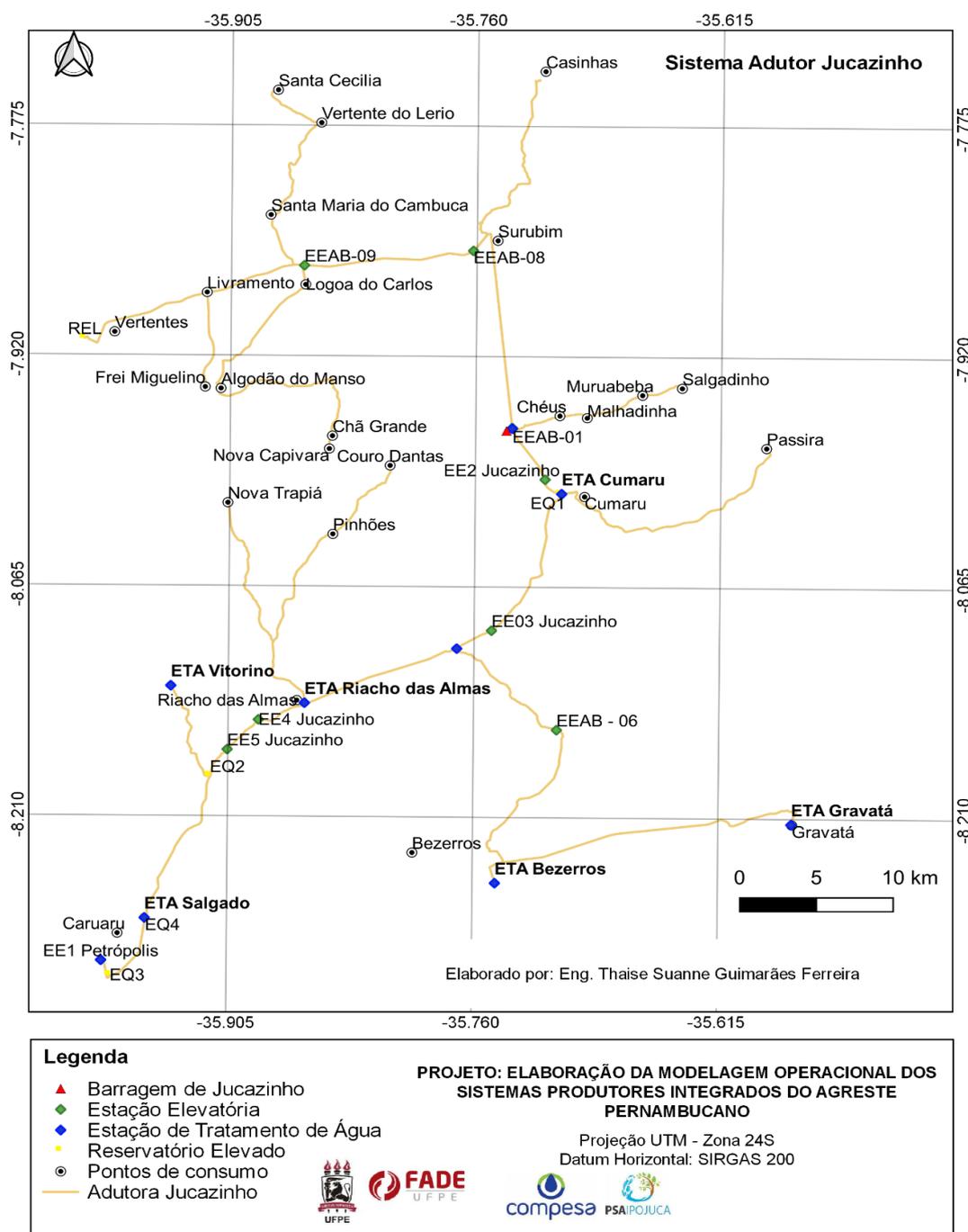
No sentido de compreender e conhecer melhor o comportamento dos sistemas adutores e o seu controle operacional, apresenta-se uma descrição detalhada dos diversos elementos dos sistemas, principalmente, no que se refere às infraestruturas que constituem o modelo a desenvolver.

### 5.1 SISTEMA ADUTOR DE JUCAZINHO (TRAMOS NORTE E SUL)

A barragem e a adutora de Jucazinho foram construídas pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS), em parceria com o Governo do Estado de Pernambuco. Construída no município de Surubim, com inícios das obras em 1996, a barragem é o terceiro maior reservatório de Pernambuco e apresenta capacidade para armazenagem de 327 milhões de metros cúbicos. Seus principais tipos de demanda são abastecimento urbano de água, abastecimento rural, dessedentação de animais e irrigação, respectivamente. Uma observação importante é que em estudos de geoprocessamento, por meio do *software* QGIS, feitos no Campo do Agreste da UFPE, mostraram que a capacidade real de Jucazinho é de cerca de 204 milhões de metros cúbicos.

É responsável atualmente pela produção (captação e tratamento) de aproximadamente 1.000 L/s, sendo 690 L/s de água bruta e 310 L/s de água tratada. O sistema parte da Barragem de Jucazinho e é constituído por duas adutoras: o Tramo Norte e o Tramo Sul, que juntas possuem um conjunto de oito estações elevatórias e uma estação de tratamento de água (ETA) no Tramo Norte. No Mapa 1 é mostrado um desenho esquemático do sistema adutor.

Mapa 1 – Traçado do sistema adutor de Jucazinho



Fonte: Fade-UFPE (2022).

O Tramo Norte é responsável pela distribuição de água tratada. A captação é feita na Barragem de Jucazinho e o tratamento acontece na ETA Jucazinho. A partir desse ponto, abastece as cidades de Surubim, Salgadinho, Casinhas, Santa Maria do Cambucá, Vertentes, Vertente do Lério, Frei Miguelinho e Toritama.

O Tramo Sul é responsável pela adução de água bruta para ETA Cumaru, que abastece as cidades de Cumaru e Passira; para a ETA Ameixas, que abastece o distrito do

mesmo nome; para a ETA Bezerros, que atende as cidades de Bezerros e Gravatá; para a ETA Riacho das Almas, que atende a própria cidade e para as ETA Salgado e Petrópolis, que atende a cidade de Caruaru.

Para representação na modelagem apenas o tronco principal das adutoras foi levado em consideração, tanto para o Tramo Sul como para o Norte. As demais derivações foram consideradas como pontos de sangria (nós de consumo).

### 5.1.1 Estações elevatórias

O Tramo Sul, responsável pelo transporte de água bruta é composto por seis estações elevatórias, estando uma delas (EEAB-6) ausente da modelagem por situar-se em uma derivação. O Tramo Norte é composto por duas estações elevatórias. Na Tabela 1 encontra-se um resumo das características das elevatórias de cada tramo.

Tabela 1 – Características das estações elevatórias do sistema adutor de Jucazinho.

Tramo	Estação Elevatória	Nº Bombas	Fabricante	Cota (m)
Sul	EEAB-1	2 + 1R	KSB	244,76
	EEAB-2	2	-	346,11
	EEAB-3	2	Worthington	418,79
	EEAB-4	2	Ingersoll-Dresser Pumps	504,50
	EEAB-5	2	Ingersoll-Dresser Pumps	591,40
Norte	EEAT-1	1 + 1R	Sulzer	246,70
	EEAT-8	8 + 1R	-	414,80
	EEAT-9	2 + 1R	-	446,60

Fonte: O Autor (2022).

### 5.1.2 Adutoras

O sistema adutor de Jucazinho, Tramo Sul, eixo principal, possui cerca de 56 quilômetros de adutora, nos quais cerca de 39 quilômetros são em regime de recalque e o restante com escoamento por gravidade. Por sua vez, o Tramo Norte, possui cerca de 100 quilômetros de adutora, nos quais 99,5 quilômetros são em regime de recalque e o restante em regime gravitacional.

Os diâmetros das tubulações são os mais variados, mudando conforme as necessidades de abastecimento e de acordo com a sua localização em relação ao sistema

adutor. No sistema estudado os diâmetros nominais estão compreendidos entre o DN 100 e DN 1000.

Na Tabela 2 pode-se observar um resumo de toda a adutora que faz parte do sistema Jucazinho, Tramo Sul e Tramo Norte.

Tabela 2 – Características dos trechos da adutora de Jucazinho por Tramo.

<b>Tramo</b>	<b>Trechos</b>	<b>DN</b>	<b>Comprimento (m)</b>	<b>Material</b>	<b>Regime de Escoamento</b>
Sul	Barragem – EEAB-1	1000	500	Aço	Gravidade
	EEAB-1 – EEAB-2	900	4.300	Aço	Recalque
	EEAB-2 – EQ-1	900	1.800	Aço	Recalque
	EQ-1 – Passira	300	5.300	FoFo	Gravidade
	EQ-1 – EEAB-3	900	11.530	Aço	Gravidade
	EEAB-3 – ETA Ameixas	900	3.100	Aço	Recalque
	ETA Ameixas – ETA Riacho	900	9.500	Aço	Recalque
	ETA Riacho – EEAB-4	900	3.840	Aço	Recalque
	EEAB-4 – EEAB-5	800	2.940	Aço	Recalque
	EEAB-5 – EQ-2	800	2.240	Aço	Recalque
EQ-2 – EQ-4	800	11.416	Aço	Recalque	
Norte	Barragem – EEAT-1	900	500	Aço	Gravidade
	EEAT-1 – Salgadinho	600	5.216	FoFo	Recalque
	Salgadinho – EEAT-8	600	21.063	FoFo	Recalque
	EEAT-8 – Surubim (baixa + sítios)	200	2.000	FoFo	Recalque
	EEAT-8 – Surubim (alta)	200	2.400	FoFo	Recalque
	EEAT-8 – Casinhas	100	14.243	FoFo	Recalque
	EEAT-8 – EEAT-9	350	11.879	FoFo	Recalque
	EEAT-9 – Nova Capivara	100	14.014	FoFo	Recalque
	EEAT-9 – Livramento	350	6.020	FoFo	Recalque
	Livramento – Vertentes	350	9.340	FoFo	Recalque
Vertentes – REL Toritama	350	13.000	FoFo	Recalque	

Fonte: O Autor (2022).

De forma resumida, o sistema adutor de Jucazinho pode ser representado conforme a Figura 4.

Figura 4 – Esquema reduzido do sistema adutor de Jucazinho.



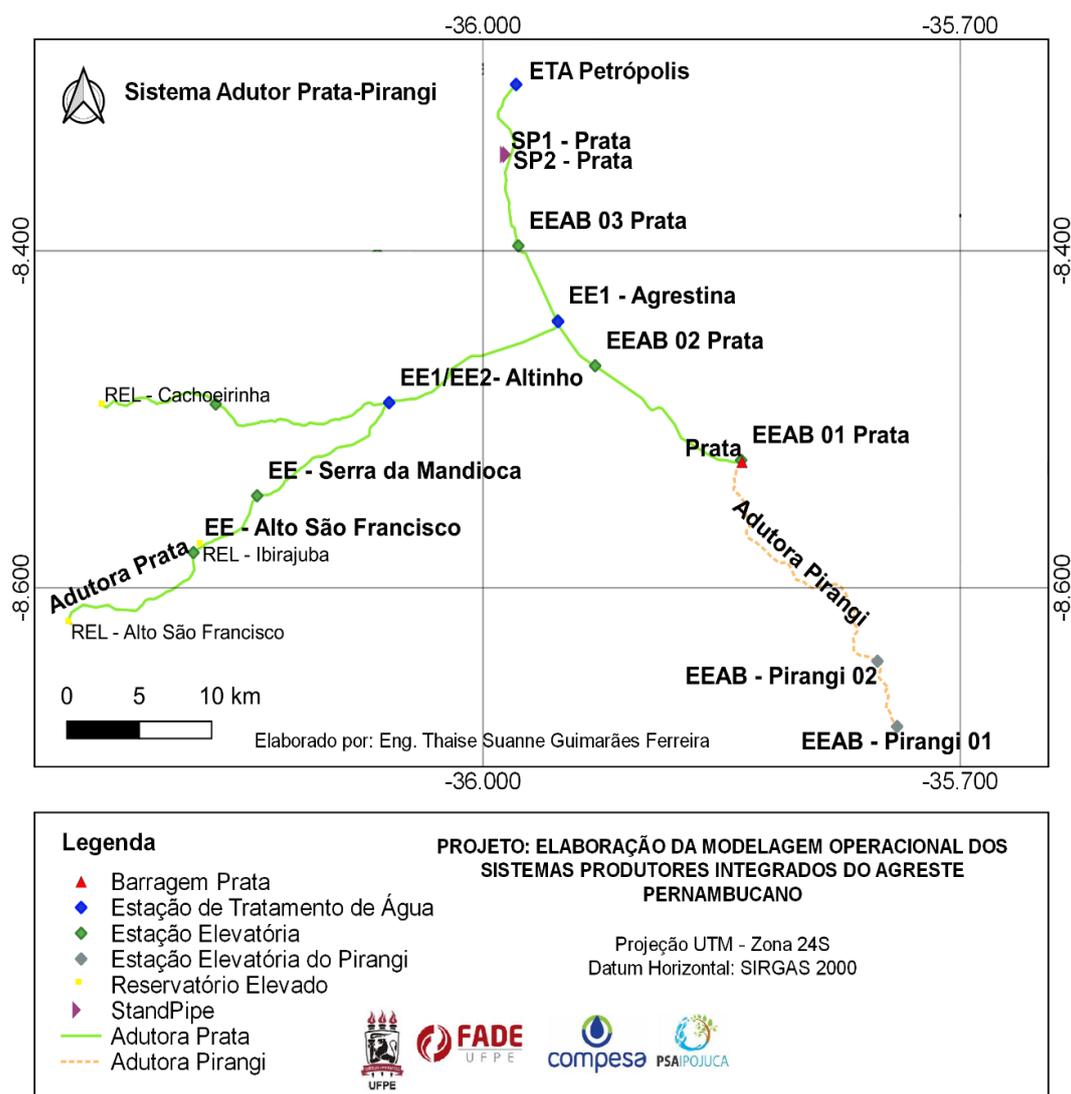
Fonte: COMPESA (2020).

## 5.2 SISTEMA ADUTOR PRATA

A barragem do Rio Prata, Mapa 2, foi construída em 1998 com o objetivo de complementar o abastecimento público de água da cidade de Caruaru. Construída no município de Bonito, agreste pernambucano, o reservatório tem capacidade para armazenagem de 42 milhões de metros cúbicos.

A capacidade de produção do sistema é de, aproximadamente, 1 m<sup>3</sup>/s. A captação é feita na Barragem do Prata por meio de uma estação elevatória. O sistema possui cerca de 30 quilômetros de extensão e se estende até a ETA Petrópolis, em Caruaru. O sistema possui 3 estações elevatórias e algumas derivações ao longo da adutora para atendimento de pequenas localidades. O traçado da adutora do Prata pode ser visto no Mapa 2.

Mapa 2 – Traçado do sistema adutor do Prata.



Fonte: Fade-UFPE (2022).

O sistema adutor do Prata é composto por duas linhas adutoras (DN 500 em aço e DN 600 em ferro dúctil) em paralelo, denominadas Prata e Camevô, respectivamente, situadas as margens da PE-120 e BR-104, que vão desde a EEAB-1 na Barragem do Prata até as ETA Petrópolis e Salgado, em Caruaru-PE, além das derivações para atender a ETA Nova Agrestina. Esta possui capacidade nominal de 100 L/s e é responsável pelo atendimento das cidades de Agrestina, Altinho, Ibirajuba e Cachoeirinha, bem como o atendimento de localidades rurais e distritos.

Para representação na modelagem apenas o tronco principal da adutora foi levado em consideração, as demais derivações foram consideradas como pontos de sangria (nós de consumo).

### 5.2.1 Estações elevatórias

São responsáveis pelo transporte de água bruta e é composta por três estações elevatórias. Na Tabela 3 é possível observar um resumo das características das elevatórias do sistema adutor do Prata.

Tabela 3 – Características das estações elevatórias do sistema adutor Prata.

Estação Elevatória	Nº 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).

### 5.2.2 Adutoras

O sistema adutor do Prata, eixo principal, possui cerca de 68 quilômetros dos quais aproximadamente 56 quilômetros são em regime de recalque e o restante em regime gravitacional.

Os diâmetros das tubulações são os mais variados, mudando consoante as necessidades de abastecimento e conforme a sua localização em relação ao sistema adutor. No sistema estudado os diâmetros indicados são apenas os DN 500 e DN 600. Na Tabela 4 e Figura 5, encontram-se um resumo de toda a adutora que parte do sistema Prata e um esquema resumido do sistema, respectivamente.

Figura 5 – Esquema resumido do sistema Prata-Pirangi.



Fonte: COMPESA (2020).

Tabela 4 – Características dos trechos do sistema adutor Prata.

Trechos	DN	Comprimento (m)	Material	Rugosidade	Regime de Escoamento
Barragem – EEAB-1	600	150	Ferro Dúctil	130	Gravidade
EEAB-1 – Barra de Riachão	500	5.350	Aço	107	Recalque
Barra de Riachão – EEAB-2	500	6.800	Aço		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		Recalque
EEAB-2 – EEAB-3	600	9.800	Ferro Dúctil	67	Recalque
EEAB-3 – <i>Standpipe</i> 1	500	6.400	Aço	130	Recalque
EEAB-3 – <i>Standpipe</i> 2	600	6.400	Ferro Dúctil	130	Recalque
<i>Standpipe</i> 1 – ETA Petrópolis	500	5.500	Aço	130	Gravidade
<i>Standpipe</i> 2 – ETA Petrópolis	600	5.500	Ferro Dúctil	130	Gravidade

Fonte: O Autor (2022).

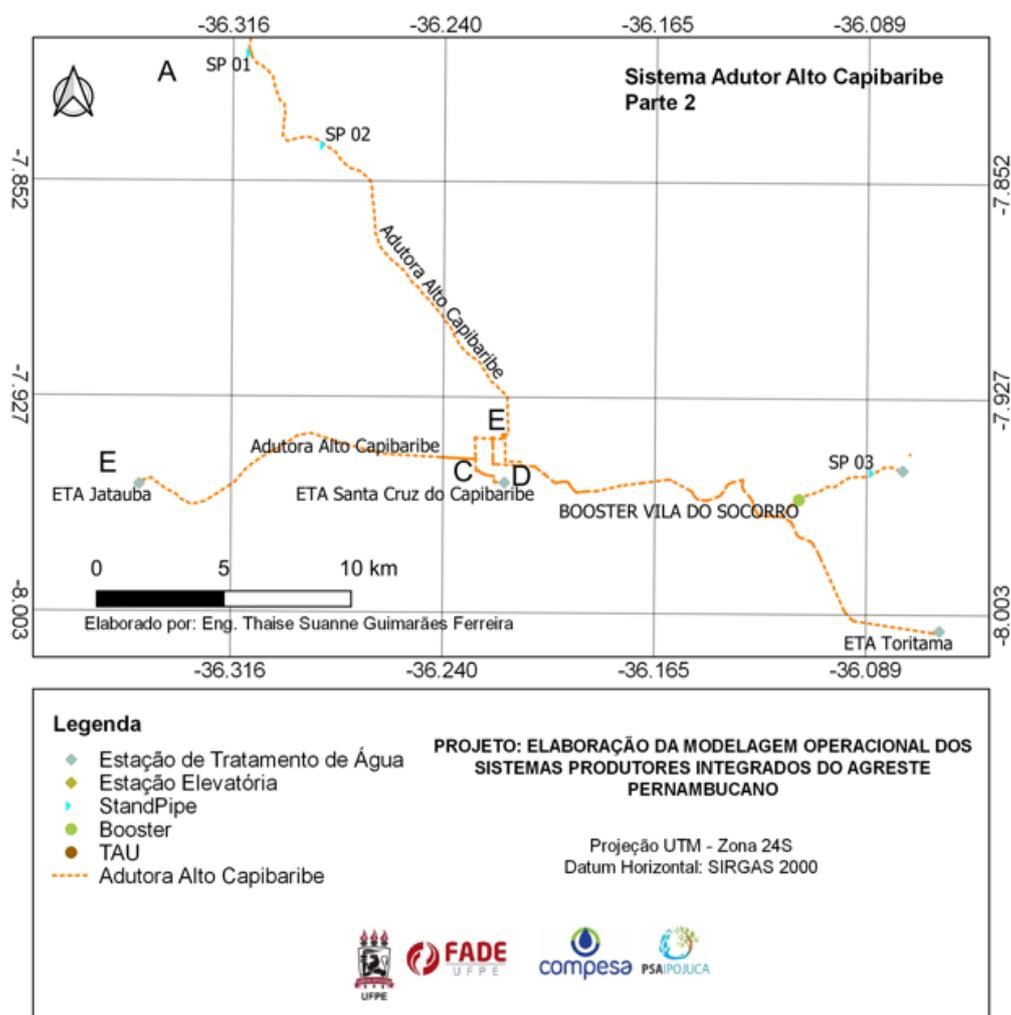
### 5.3 SISTEMA ADUTOR ALTO CAPIBARIBE

A adutora do Alto Capibaribe, que captará água do Açude Epitácio Pessoa (Boqueirão), no território do estado da Paraíba, será contemplada na primeira etapa com a implantação das adutoras, iniciando com a captação, com 51 km de extensão até à cidade de Santa Cruz do Capibaribe, onde a mesma será interligada à Adutora do Agreste e à Adutora de Jucazinho, permitindo que a água chegue às cidades de Toritama, Vertentes, Frei Miguelinho, Santa Maria do Cambucá e Vertente do Lério. Além disso, serão implantados trechos complementares para o atendimento às cidades de Jataúba (16 km) e Taquaritinga do Norte (5 km).

O sistema adutor será composto por um trecho em recalque (da estação elevatória ao *Standpipe* 1) e trechos de gravidade, ligando o SP1 aos pontos de entrega nas ETA existentes. Os pontos de entrega são: ETA Santa Cruz do Capibaribe, ETA Poço Fundo (Jataúba), ETA Mateus Vieira (Taquaritinga do Norte), e ETA Toritama (Toritama, Frei Miguelinho, Santa Maria do Cambucá, Vertente do Lério e Vertentes). O percurso do sistema adutor do Alto Capibaribe pode ser visualizado no Mapa 3.

Os dados utilizados para a modelagem do sistema adutor do Alto Capibaribe foram retirados do projeto, uma vez que o sistema ainda não se encontra em operação.

Mapa 3 – Traçado do sistema adutor do Alto Capibaribe.



Fonte: Fade-UFPE, 2022.

### 5.3.1 Estações elevatórias

As estações elevatórias que integram o sistema adutor do Alto Capibaribe são responsáveis pelo transporte de água bruta e é munida de duas estações elevatórias, a primeira referente à captação, que ocorre por um canal de aproximação, através de bombas anfíbias instaladas diretamente no canal, e a segunda uma estação elevatória de percurso.

Na Tabela 5 é possível observar um resumo das características das elevatórias do referido sistema adutor.

Tabela 5 – Características das estações elevatórias do sistema do Alto Capibaribe.

<b>Estação Elevatória</b>	<b>Nº Bombas</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Cota (m)</b>
EE Captação	3 + 1R	Higra	384
EEAB-2	3 + 1R	Imbil	387

Fonte: O Autor (2022).

### 5.3.2 Adutoras

O sistema adutor do Alto Capibaribe possui cerca de 93 km de adutora, dos quais cerca de 29 quilômetros são em regime de recalque e o restante em regime gravitacional.

Os diâmetros das tubulações são os mais variados, mudando consoante as necessidades de abastecimento e conforme a sua localização em relação ao sistema adutor. No sistema estudado os diâmetros indicados estão entre DN 200 e DN 700. Na Tabela 6 é apresentado um resumo de toda a adutora que faz parte do sistema Alto Capibaribe.

Tabela 6 – Características dos trechos da adutora do Alto Capibaribe.

<b>Trechos</b>	<b>DN</b>	<b>Comprimento (m)</b>	<b>Material</b>	<b>Regime de Escoamento</b>
EE Captação – EEAB-1	500	206,0	DEFoFo	Recalque
EEAB-1 – <i>Standpipe</i> 1	700	25.991,9	DEFoFo	Recalque
<i>Standpipe</i> 1 – <i>Standpipe</i> 2	700	5.650,0	DEFoFo	Gravidade
<i>Standpipe</i> 2 – Ponto B	600	14.277,2	DEFoFo	Gravidade
Ponto B – Ponto C	400	2.221,2	DEFoFo	Gravidade
Ponto C – ETA Jataúba	200	14.631,7	DEFoFo	Gravidade
Ponto C – ETA Santa Cruz do Capibaribe	400	1.860,5	DEFoFo	Gravidade
Ponto B – Vila Socorro	500	14.029,6	DEFoFo	Gravidade
Vila Socorro – ETA Toritama	500	8.674,3	DEFoFo	Gravidade
Vila Socorro – Booster	200	760,0	DEFoFo	Gravidade
Booster – <i>Standpipe</i> 3	200	3.233,9	DEFoFo	Recalque
<i>Standpipe</i> 3 – ETA Mateus Vieira	200	1.241,0	DEFoFo	Gravidade

Fonte: O Autor (2022).

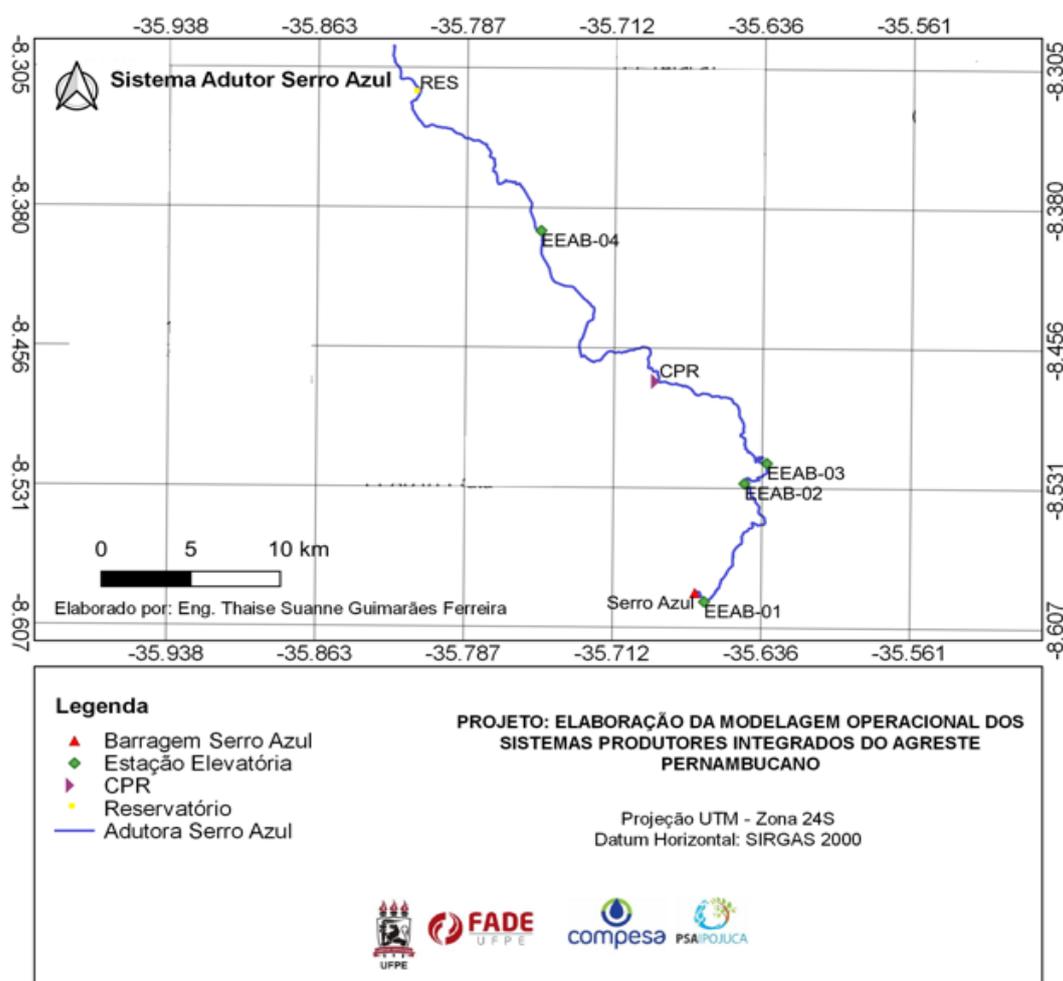
## 5.4 SISTEMA ADUTOR SERRO AZUL

O sistema adutor de Serro Azul terá sua captação instalada à montante da válvula dispersora da Barragem de Serro Azul, localizada no município de Palmares-PE, a cerca de 157 metros acima do nível do mar.

Partindo da tomada d'água, a adutora seguirá uma extensão de aproximadamente 58 quilômetros, passando pela zona rural das cidades de Bonito, Barra de Guabiraba, Camocim de São Félix e Bezerros, até alcançar as margens da BR-232, na qual será interligada à Adutora do Agreste. O traçado do sistema adutor de Serro Azul pode ser visualizado no Mapa 4.

Os dados utilizados na modelagem desse sistema adutor foram retirados de projeto, já que o sistema ainda não se encontra em funcionamento.

Mapa 4 – Traçado do sistema adutor de Serro Azul.



Fonte: Fade-UFPE (2022).

### 5.4.1 Estações elevatórias

São responsáveis pelo transporte de água bruta e é composta por quatro estações elevatórias. Na Tabela 7 é possível observar as características das estações elevatórias que compõem o sistema adutor de Serro Azul.

Tabela 7 – Características das estações elevatórias do sistema adutor de Serro Azul.

<b>Estação Elevatória</b>	<b>Nº Bombas</b>	<b>Cota (m)</b>
EEAB-1	3 + 1R	145,58
EEAB-2	3 + 1R	368,12
EEAB-3	3 + 1R	524,96
EEAB-4	3 + 1R	643,32

Fonte: O Autor (2022).

### 5.4.2 Adutoras

O sistema adutor possui cerca de 58 quilômetros, dos quais cerca de 37 quilômetros são em regime de recalque e os demais são em regime gravitacional. Os diâmetros das tubulações são os mais variados, mudando conforme as necessidades de abastecimento e de acordo com a sua localização em relação ao sistema adutor. No sistema estudado os diâmetros indicados estão entre DN 700 e DN 800. Na Tabela 8 pode-se observar um resumo do traçado da adutora.

Tabela 8 – Características dos trechos da adutora de Serro Azul.

<b>Trechos</b>	<b>Diâmetro Interno</b>	<b>Comprimento (m)</b>	<b>Material</b>	<b>Regime de Escoamento</b>
Barragem – EEAB-1	823,8	741,6	Ferro dúctil	Gravidade
EEAB-1 – EEAB-2	721,2	10.247,7	Ferro dúctil	Recalque
EEAB-2 – EEAB-3	721,2	3.062,5	Ferro dúctil	Recalque
EEAB-3 – CRP	721,2	10.478,9	Ferro dúctil	Recalque
CRP – EEAB-4	721,2	16.210,0	Ferro dúctil	Gravidade
EEAB-4 – Reservatório de regulação	721,2	13.770,0	Ferro dúctil	Recalque
Reservatório de regulação – Conexão	721,2	3.805,2	Ferro dúctil	Gravidade

Fonte: O Autor (2022).

## 6 CONSTRUÇÃO DO MODELO HIDRÁULICO

A simulação hidráulica é indispensável para o controle eficiente de sistemas hidráulicos complexos, e constitui-se um instrumento com um vasto domínio de aplicabilidade, podendo ser empregada no planejamento, projeto, operação, manutenção e reabilitação dos sistemas de abastecimento de água.

O processo de modelagem envolve desde a captação de dados, os mais precisos e próximos à realidade possíveis, até a simulação do modelo para se fazer as análises acerca da confiabilidade do sistema. A qualidade da modelagem dependerá fortemente da qualidade dos dados de entrada e parâmetros adotados no modelo. Nessa pesquisa, foram construídos modelos com o objetivo principal de torná-los uma representação fidedigna quanto ao comportamento hidráulico dos sistemas reais estudados.

A construção de qualquer modelo de simulação necessita de informações relevantes para o funcionamento do mesmo. Conforme Coelho, Loureiro e Alegre (2006), no caso de modelo hidráulico, é necessário um prévio conhecimento acerca de algumas características, tais como:

- Topologia, geometria, altimetria e características da infraestrutura física que influenciam o comportamento hidráulico, tais como tubulações, materiais, válvulas, reservatórios e bombas;
- Solicitações ao sistema na forma de consumos e vazões;
- Funcionamento operacional da rede.

Para atingir os objetivos propostos, as seguintes etapas metodológicas serão executadas: levantamento de dados, tratamento dos dados obtidos, construção dos modelos hidráulicos, calibração e exploração dos modelos.

### 6.1 LEVANTAMENTO DOS DADOS

As informações necessárias à construção do modelo foram obtidas a partir do banco de dados da COMPESA e as informações que a companhia não possuía foram levantadas *in loco* a partir de visitas aos sistemas adutores estudados. A visita *in loco* é imprescindível, pois o conhecimento da realidade local possibilita uma adequada representação computacional dos sistemas estudados. A boa qualidade dos dados de entrada é imprescindível para que a modelagem seja bem sucedida e fique próxima a

realidade conseguindo assim transmitir confiabilidade nos seus resultados. No Quadro 4 define-se as informações e registros necessários para a construção do modelo.

Quadro 4 – Informações necessárias à construção do modelo.

<b>Elementos</b>	<b>Informações</b>
Reservatórios	Dimensões
	Cotas
	Níveis de funcionamento
Adutoras	Comprimento
	Diâmetro
	Cotas
	Material
Estações Elevatórias	Número de conjuntos motor-bomba
	Curva característica da bomba
Válvulas	Cotas
	Diâmetro
	Tipo
Demandas nos pontos de entrega	

Fonte: O Autor (2022).

As visitas aos sistemas adutores tiveram como finalidade a busca de informações acerca da cota topográfica das estações elevatórias e reservatórios, quantidade de conjuntos motor-bomba em funcionamento em cada estação elevatória, tipo e uso das válvulas, medições pitométricas e levantamento das curvas das bombas, características geométricas dos sistemas, medição de vazões e pressão e obtenção do parâmetro C de rugosidade.

## 6.2 CONSTRUÇÃO DOS MODELOS HIDRÁULICOS

Os modelos construídos têm como finalidade reproduzir com a maior fidelidade os parâmetros hidráulicos e físicos dos sistemas adutores estudados. A qualidade dos dados de entrada é que vai permitir aferir se o modelo está próximo da realidade e terá sucesso ou não. Portanto, os modelos resultantes deverão refletir o mais fiel possível os comportamentos dos sistemas adutores reais estudados, de forma que os valores obtidos nas simulações efetuadas se aproximem daqueles obtidos nos sistemas reais.

Os modelos para sistemas de adução necessitam de um elevado grau de detalhe no que se refere às regras operacionais, funcionamento dos conjuntos motor-bomba, configurações dos reservatórios e restante dos equipamentos. Assim, a elaboração do

modelo requer o maior cuidado e atenção por parte dos modeladores. Da sua rigorosa construção vai depender o sucesso ou fracasso de toda a modelagem, assegurando o correto funcionamento do sistema e a veracidade da informação fornecida pelo modelo.

Os modelos hidráulicos foram construídos com o auxílio do simulador hidráulico EPANET 2.0. Os projetos dos sistemas estudados foram disponibilizados pela COMPESA em formato “.DWG” (*AutoCad*). Para colocá-los em formato “.NET”, extensão reconhecida pelo EPANET, foi necessário convertê-los com auxílio de um outro programa, EpaCAD. Como o modelo resultante da importação da geometria da rede somente contém a descrição geométrica do sistema, traçado das adutoras, se faz necessário inserir manualmente os dados levantados anteriormente. Deste modo, informações como cotas topográficas, quantidade de conjuntos motor-bomba, válvulas, reservatórios, diâmetros e comprimentos das adutoras devem ser inseridos, manualmente, após a geometria do sistema já estiver representada no simulador hidráulico.

Antes de iniciar o carregamento de dados para o modelo, foram configuradas as opções necessárias do *software*, nomeadamente no que se refere a unidades das principais grandezas consideradas na modelagem que são fundamentais para o carregamento dos dados descritivos do modelo e para a expressão dos seus resultados.

É importante atentar-se às unidades de grandeza a serem utilizadas no *software* EPANET 2.0, que serão as do sistema internacional (SI) listados no Quadro 5.

Quadro 5 – Unidades das grandezas da modelagem.

<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>
Consumo nos nós	L/s
Rugosidade absoluta	mm
Diâmetro dos trechos	mm
Diâmetro dos reservatórios	mm
Rendimento dos conjuntos motor-bomba	%
Cota topográfica	m
Vazão nos trechos	L/s
Carga hidráulica nos nós	m
Comprimento dos trechos	m
Potência	kW
Pressão nos nós	m
Coefficiente de perda de carga	m/Km
Velocidade nos trechos	m/s
Volume	m <sup>3</sup>

Fonte: O Autor (2022).

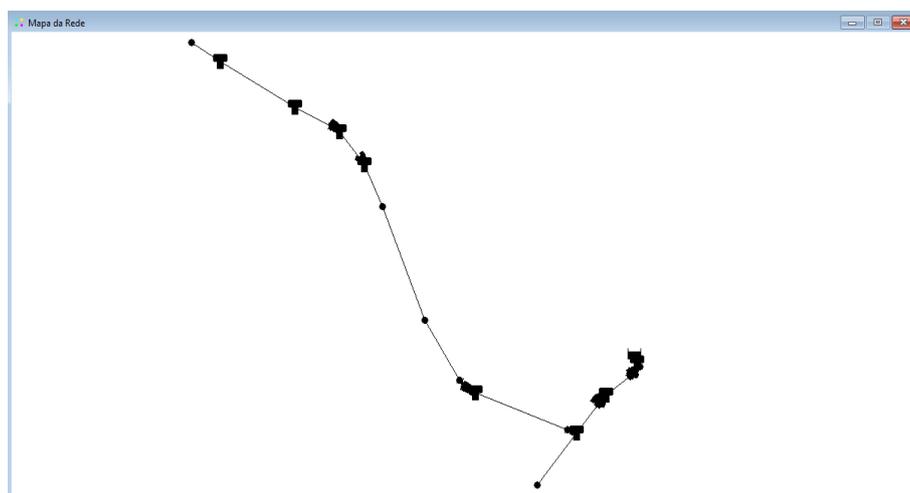
Nota: Adaptado de ROSSMAN (2009).

### 6.2.1 Adutoras

Primeiramente, os trechos das adutoras provenientes de arquivos no formato AutoCAD com a configuração real do sistema adutor foram introduzidos em ambiente EPANET, o que possibilitou de forma imediata obter o traçado da rede e os pontos notáveis. Em um segundo momento, foram analisados os nós para posteriormente se introduzirem as cotas destes e os diâmetros das 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 retirada) podendo estas integrar derivações e válvulas. A Figura 6 apresenta o traçado de uma adutora inserida no modelo EPANET.

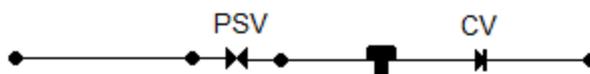
Figura 6 – Representação do traçado de uma adutora no *software* EPANET.



Fonte: O Autor (2022).

A opção de estado aberto, fechado ou contendo uma válvula de retenção foi definida como “aberto” para a generalidade dos trechos, verificando-se apenas a jusante dos reservatórios a colocação de tubulação com válvula de retenção de modo a impor que o escoamento se processe apenas em um sentido. A montante dos reservatórios de nível variado foi colocado uma válvula sustentadora de pressão ou válvula de controle de pressão a montante (PSV) para caracterizar a entrada de água por cima do nível máximo da água nos reservatórios. A Figura 7 apresenta um trecho que contém as válvulas de retenção (CV) e a válvula de controle de pressão (PSV) de um trecho da adutora.

Figura 7 – Válvula *PSV* à montante e válvula *CV* à jusante do reservatório.



Fonte: O Autor (2022).

## 6.2.2 Reservatórios

Os reservatórios foram introduzidos no modelo logo após os trechos das adutoras conforme as posições reais nos sistemas. Para inserção dos reservatórios no modelo o *software* dispõe de dois tipos: os reservatórios de nível fixo (RNF) e os reservatórios de nível variado (RNV). Estes se diferenciam daqueles, pois têm uma capacidade de armazenamento limitada e seu volume de água pode variar ao longo da simulação.

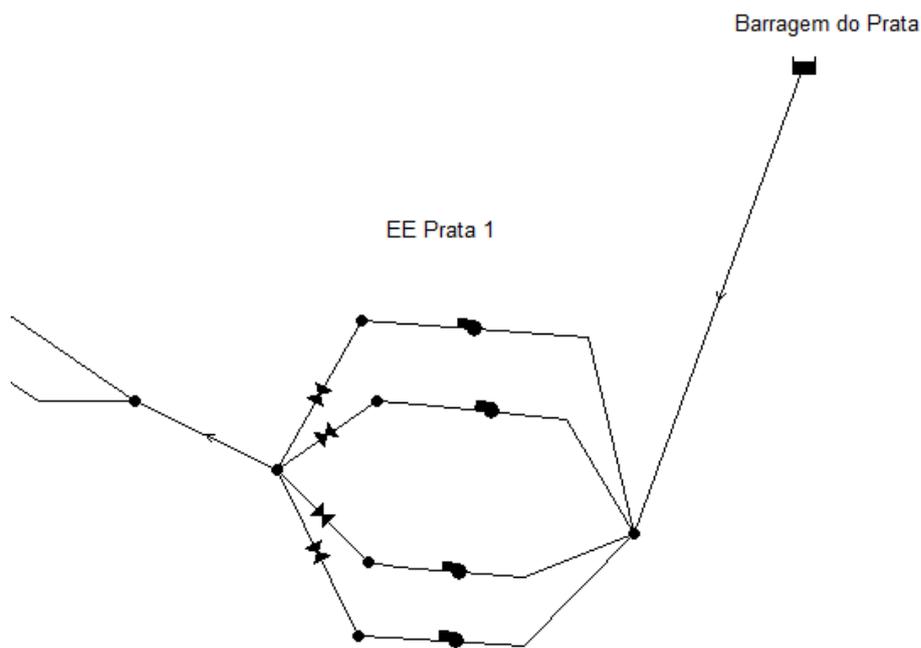
Os RNF representam um volume de armazenamento de água de capacidade ilimitada e carga hidráulica constante. O RNV possui uma capacidade de armazenamento limitada e seu volume de água pode variar ao longo da simulação. São modelados para operar entre as alturas de água mínima e máxima. Deste modo, o EPANET interrompe a saída ou entrada de vazão do reservatório de nível variado caso a altura de água mínima ou máxima seja atingida.

Por exemplo, observa-se que o sistema adutor do Prata é composto por dois reservatórios de nível fixo e cinco reservatórios de nível variado. O RNF representa a origem de água do sistema, ou seja, a Barragem do Prata, que corresponde à captação do sistema, e o ponto final, que corresponde à Estação de Tratamento de Água – ETA. Já os reservatórios de nível variável representam os poços de sucção das estações elevatórias e os *standpipes*.

Como a entrada de água nos reservatórios é efetuada por cima, foi necessário recorrer a uma válvula do tipo controle de pressão (PSV), regulada para o nível de entrada de água no reservatório de modo a garantir a correta simulação desta particularidade, a montante e, a jusante, uma válvula de retenção (CV) para garantir que a água escoe em um único sentido.

A Figura 8 apresenta o reservatório de nível fixo juntamente com as válvulas mencionadas e o conjunto elevatório inicial associado à adutora do Prata.

Figura 8 – RNF, estação elevatória e válvulas da adutora do Prata.



Fonte: O Autor (2022).

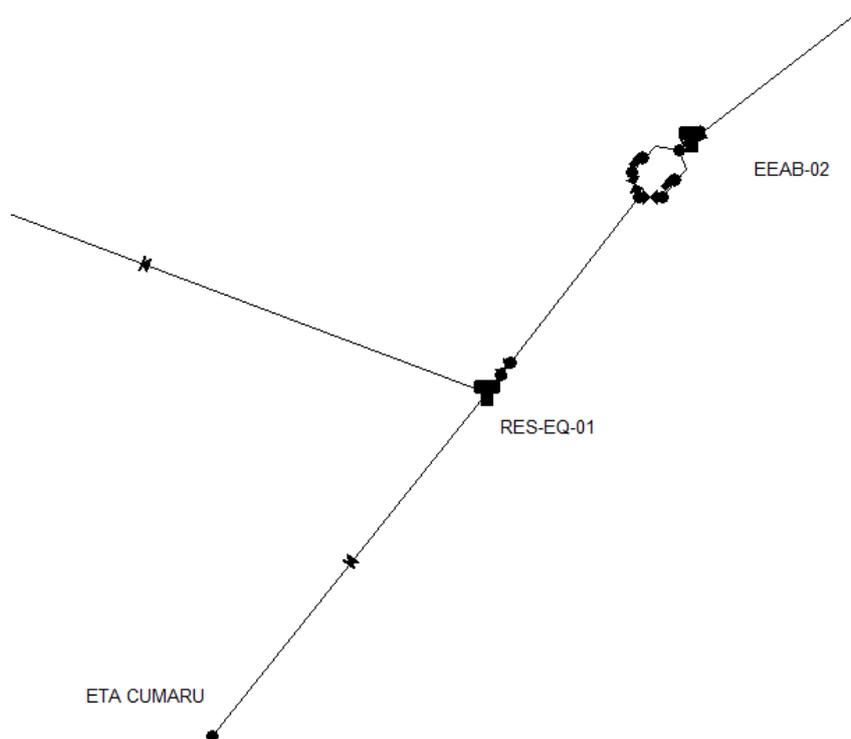
Ademais, com a ajuda de informações obtidas in loco ou retiradas de projeto, nas propriedades destes elementos introduziram-se os valores de cota, altura de água inicial, altura de água mínima, altura de água máxima e seu respectivo diâmetro.

### 6.2.3 Nós

Nós sistemas em estudo existem dois tipos de nós: os representativos de derivações e os que representam pontos de entrega. Fisicamente, todos os nós representativos de derivações e pontos de entrega foram automaticamente inseridos no modelo com a importação do traçado da rede, sendo apenas necessário colocar sua cota topográfica e as demandas.

São considerados nós de consumo aqueles nós que representam uma região do trecho da adutora em que o consumo é pequeno e não faz parte da adutora principal. Na Figura 9 observa-se um exemplo de trecho da rede adutora em que se identifica um ponto de consumo, ETA Cumaru, que faz parte do sistema adutor de Jucazinho Tramo Sul.

Figura 9 – Identificação de nós de consumo.



Fonte: O Autor (2022).

#### 6.2.4 Estações elevatórias

Tomando-se como exemplo o sistema adutor de Jucazinho, Tramo Norte, observa-se que este é composto por 3 estações elevatórias, a saber: EEAT-1, EEAT-8 e EEAT-9. Vale destacar que uma estação elevatória pode, por meio de derivações, levar água para locais diferentes. A EEAT-8, por exemplo, possui conjuntos motor-bomba destinados a Surubim (parte alta e parte baixa), Casinhas e para a EEAT-9. Com base nas informações adquiridas *in loco* ou de projeto, foram colocados no EPANET todos os grupos motor-bomba que integram o sistema. Com o auxílio de catálogos de bombas, projeto e auxílio da pitometria foi possível caracterizar e complementar os grupos elevatórios.

É importante destacar que alguns sistemas em estudo já se encontram em funcionamento há alguns anos e é esperado que, por vezes, as informações relativas ao funcionamento da bomba estejam desatualizadas, pois, com o passar do tempo, tende a perder a capacidade de elevação. Por meio de análise pitométrica é possível estabelecer o ponto de funcionamento atual de alguns grupos. Como dito anteriormente, alguns sistemas ainda não estão em funcionamento, portanto as informações dos conjuntos motor-bomba foram adquiridas via projeto.

O mais indicado para gerar a curva característica  $Q \times H$  de um conjunto motor-bomba é o levantamento de, pelos menos, três pontos de operação. Entretanto, por vezes, não é possível a realização de medições pitométricas *in loco*. Para suprir essa dificuldade, o EPANET consegue gerar a curva característica da bomba utilizando apenas um par de valor, um ponto de funcionamento.

As curvas características dos sistemas do Alto Capibaribe e de Serro Azul foram inseridas com base em informações fornecidas pelos fabricantes. Os modelos e valores são citados nos projetos, memoriais de cálculo, fornecidos pela Companhia Pernambucana de Saneamento – COMPESA. As curvas características dos sistemas de Jucazinho e do Prata foram obtidas por meio de análise pitométrica, mas, devido às dificuldades de medição, não foi possível gerar um grupo de três pontos de operação (vazão e pressão).

Na Fotografia 1, observa-se a Estação Elevatória 3 (EEAT-3) do sistema Prata. Na Fotografia 2 observa-se a Estação Elevatória 5 (EEAT-5) do sistema de Jucazinho. A Figura 10 mostra a curva característica do conjunto motor-bomba do sistema adutor do Alto Capibaribe.

Fotografia 1 – Estação elevatória 3 do sistema adutor Prata.



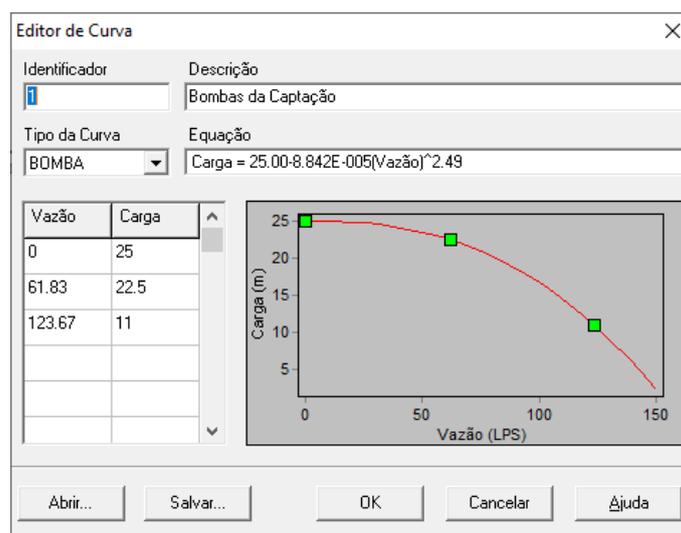
Fonte: O Autor (2022).

Fotografia 2 – Estação elevatória 5, Tramo Sul, sistema Jucazinho.



Fonte: O Autor (2022).

Figura 10 – Curva característica da estação elevatória principal do sistema adutor do Alto Capibaribe.



Fonte: O Autor (2022).

## 6.2.5 Válvulas

Para finalizar a construção do modelo, foram colocadas as válvulas necessárias ao modelo, umas associadas aos reservatórios e outras aos conjuntos motor-bomba. Nos sistemas adutores modelados foram introduzidos dois tipos de válvulas:

- PSV – Válvula Sustentadora de Pressão ou Válvula de Controle da Pressão a montante (*Pressure Sustaining Valve*);

- FCV – Válvula Reguladora de Vazão (*Flow Control Valve*).

Na entrada dos reservatórios de nível variado 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. Podem estar parcialmente abertas, completamente aberta ou fechada.

Uma PSV não pode ser ligada diretamente a um reservatório seja de nível fixo ou variado. 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. Os parâmetros de controle na PSV, que neste tipo de válvula é a pressão, deve ser zero e a cota dos nós de extremidade da válvula deve ser igual à cota da tubulação real que chega ao reservatório.

Na saída dos conjuntos motor-bomba foram inseridas válvulas do tipo FCV, que possuem a função de controlar a vazão de saída dos conjuntos, ou seja, a possibilidade de simular a operação das bombas com registros “estrangulados”. Mais uma vez, assim como na PSV, uma FCV não pode ser ligada diretamente a um reservatório de nível fixo ou variado.

No sistema adutor do Alto do Capibaribe foram inseridas válvulas reguladoras de vazão para simular o controle de vazão ao longo da adutora. Com isso, foi possível modelar a condição operacional, vazões dos diversos trechos, previstas no projeto.

Com todos os procedimentos acima completos, os sistemas adutores selecionados ficaram fisicamente modelados. Foram criteriosamente colocadas todas as informações, elementos e acessórios necessários para a correta caracterização dos sistemas.

## 7 CALIBRAÇÃO

É uma importante etapa do trabalho, uma vez que permite a identificação de anomalias e funcionamento dos modelos, bem como a análise e correção por meio de processo iterativo com base na repetição de simulações computacionais do modelo. Estes resultados e suas respectivas interpretações têm como objetivo a utilização do modelo para planejamento e apoio à futura exploração (LIMA, 2008).

Como mencionado anteriormente, a qualidade da modelagem depende da qualidade dos dados e dos parâmetros de entrada, ou seja, a precisão dos modelos depende diretamente da calibração.

De acordo com Ostfeld *et al.* (2012), a calibração é um processo de comparação de resultados de um modelo com as observações de campo. Deve-se ajustar os dados e parâmetros quantas vezes forem precisos até que o comportamento do modelo seja próximo ao observado no sistema real.

Portanto, a calibração consiste em variar certos parâmetros desconhecidos, a fim de minimizar a diferença entre os valores de vazão e de pressão calculados pelo modelo hidráulico e os obtidos na medição. Estes parâmetros são considerados variáveis e pode ser: 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 de desempenho dos conjuntos motor-bomba.

Desta forma, o entendimento de que o modelo se encontra calibrado deve-se à comparação entre os resultados hidráulicos obtidos pelo modelo e os cadastros das leituras efetuadas, por exemplo, pela pitometria.

Assim, nota-se que a calibração é um processo demorado que requer uma análise cuidadosa dos diversos parâmetros envolvidos na simulação, porém é de suma importância.

De uma forma geral, a calibração foi feita do seguinte modo, após a inserção dos dados de entrada, foi feita a simulação do modelo e a comparação entre as vazões encontradas na modelagem e as medidas em campo. Como se trata de adutoras, as vazões foram comparadas, por outro lado, caso o estudo de caso fosse uma rede de distribuição, as medições de pressão seriam utilizadas como variáveis para a calibração.

Neste caso, o parâmetro variado, visando a aproximação das vazões, foi o valor do coeficiente de perda de carga  $C$ , que foi alterado diretamente no modelo hidráulico até que os valores modelados ficassem próximos aos medidos *in loco*.

## 7.1 ANÁLISE PITOMÉTRICA

A calibração, para este trabalho, utilizou dados advindos de campanhas pitométricas. Desta forma, abaixo estão listadas algumas informações que podem ser obtidas a partir da análise pitométrica.

- Diâmetro real da tubulação;
- Valores de vazão e pressão;
- Valores de velocidade;
- Cálculo do coeficiente *C* de *Hazen-Williams*;
- Construção da curva característica dos conjuntos motor-bomba.

A análise pitométrica não é uma tarefa simples e sua dificuldade também passa pela estrutura do sistema que está sendo estudado. Uma das dificuldades é que para a implantação da estação pitométrica (EP) necessita-se que a localização seja a uma distância preestabelecida em função do tipo de medidor. No caso desta pesquisa, como foi adotado um tubo pitot com maleta Lamon para as medições, os trechos retos mínimos equivalem a 10 diâmetros da tubulação a montante e 20 diâmetros a jusante de qualquer singularidade na tubulação. Além disso, deve-se ter uma perfeita sincronia entre as equipes que estão nas diferentes estações elevatórias. Esse tipo de comunicação, por vezes, é feito por meio de rádio de comunicação.

Uma outra dificuldade encontrada com frequência no levantamento de dados é que a maioria dos sistemas brasileiros, entre esses, os estudados aqui, não fazem muitos investimentos para uma análise pitométrica mais segura e confiável. Por exemplo, em muitas estações elevatórias não existem manômetros para aferição da pressão a montante e jusante do conjunto motor-bomba.

## 7.2 CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS CONJUNTOS MOTOR-BOMBA

A partir da análise pitométrica foi possível estabelecer o ponto de funcionamento atual de alguns grupos motor-bomba dos sistemas adutores. Vale lembrar que, como os sistemas adutores de Serro Azul e Alto do Capibaribe ainda não estão em funcionamento, todos os valores de parâmetros utilizados foram de projetos. Portanto, apenas foram feitas análises pitométricas nos sistemas adutores de Jucazinho e Prata.

Na análise pitométrica o ideal é que sejam feitos cenários diferentes de avaliação dos conjuntos motor-bomba para se chegar aos três pontos de vazão e pressão que serão utilizados para compor a curva característica do sistema. Geralmente, o recomendado é que esses três pontos sejam de vazão máxima, com o registro todo aberto, vazão intermediária e *shut-off*, vazão zero, com o registro fechado. Além disso, deve-se analisar vários cenários de utilização dos conjuntos motor-bomba, como por exemplo, os três conjuntos abertos, depois apenas dois conjuntos totalmente abertos e um estrangulado e assim por diante.

Desta forma, consegue-se fazer um diagnóstico do desempenho da bomba hidráulica comparando a curva característica gerada (vazão x pressão) com a curva fornecida pelo fabricante. Porém, por problemas diversos, não foi possível a realização de todos esses cenários *in loco*.

As curvas características dos conjuntos motor-bomba dos sistemas adutores Prata e Jucazinho foram definidas no modelo hidráulico com base em um ponto médio de operação, visto que os resultados de alguns cenários foram muito próximos fazendo com que não se conseguisse chegar a três pontos diferentes.

Por isso, devido a essas dificuldades, poucos pontos de operação foram levantados e como consequência utilizou-se um ponto médio para a curva característica, já que o EPANET consegue gerar a curva com pelo menos um ponto de vazão e pressão. Vale mencionar que, nos locais em que não foram feitas análises pitométricas, foram usados dados nominais de projeto.

### 7.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

É importante, na fase de calibração, sabermos o quão próximo o modelo está do sistema real, pois isso trará uma maior confiabilidade ao modelo. Neste sentido, foi feita uma análise estatística a partir da correlação existente entre os valores modelados e os valores obtidos a partir da pitometria. O próprio EPANET pode fazer esse tipo de análise, basta cadastrar na aba projetos na opção dados de calibração os valores modelados e os obtido em campos dos valores que se quer fazer a análise.

De um modo simplificado, a correlação mostra o grau de similaridade, a relação e a independência existente entre duas ou mais variáveis. Seu valor pode variar entre 1 e -1. Quanto mais próximo de 1, maior é o grau de correlação positiva entre as variáveis, ou seja, quando uma aumenta, a outra também aumenta, e quando uma diminui, a outra

também diminui. Quanto mais próximo de -1, maior o grau de correlação negativa, isto é, quando uma aumenta, a outra diminui e vice-versa. Caso sejam variáveis totalmente independentes entre si, a sua correlação será igual a zero. Uma outra informação importante da correlação é que ela informa a intensidade da associação entre as variáveis, ou seja, será mais forte, se próxima de 1 ou -1, e mais fraca, se próxima de zero.

O coeficiente de correlação de Pearson (R) pode ser obtido a partir da Equação 1 descrita abaixo.

$$R(x, y) = \frac{Cov(x, y)}{\sigma_x * \sigma_y} \quad (1)$$

Em que:

- R é coeficiente de correlação;
- Cov é a covariância;
- $\sigma$  é o desvio padrão.

Por sua vez, a covariância e o desvio padrão podem ser obtidos pelas Equações 2 e 3, respectivamente.

$$Cov(x, y) = E(x, y) - E(x) * E(y) \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{Variância} \quad (3)$$

Em que:

- E é igual a média.

A variância é obtida pela Equação 4.

$$\sigma^2 = \frac{\sum(x_i - E)^2}{n} \quad (4)$$

Em que:

- Xi são os dados existentes;
- E é a média dos valores.

Uma forma de visualizar a existência de alguma associação entre duas variáveis é a utilização de gráficos de dispersão. Quando os dados se encontram ao longo de uma reta, pode-se afirmar que existe uma forte dependência linear entre as variáveis.

Ao se colocar os dados em um gráfico, desde que sejam variáveis com alguma dependência entre si, pode-se utilizar a regressão linear que analisa a relação existente entre as variáveis permitindo prever uma delas com base no conhecimento da outra. A regressão é feita pelo método dos mínimos quadrados, em que se busca diminuir o erro.

Ao obter uma reta de regressão linear, pode-se obter um fator que mostra a medida de força da ligação entre as variáveis envolvidas. Esse fator é o Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ), que mede o percentual de uma variável que é atribuída a variância da outra variável. Quanto mais próximo de 1, ou 100%, maior é a relação entre as variáveis. O  $R^2$  mostra o quão bem o modelo de regressão se ajusta aos dados observados. Um resultado alto, ou seja, próximo a 1, significa que os dados apresentam uma maior precisão e, por consequência, menor incerteza. Ainda como informação, o  $R^2$  é o quadrado do coeficiente de correlação de Pearson.

Além disso é importante verificar algumas medidas de dispersão como, por exemplo, o Desvio Padrão ( $\sigma$ ) e o Coeficiente de Variação ( $C_V$ ).

O Desvio Padrão indica o grau de variabilidade de um conjunto de dados. Dessa forma, os dados podem ser considerados mais homogêneos, uniformes e confiável. Um Desvio Padrão alto significa que os dados estão bem distribuídos em torno da média indicando uma maior dispersão. Por sua vez, um Desvio Padrão baixo indica que eles estão próximos à média

O Coeficiente de Variação fornece a variação dos dados obtidos em relação à média. Desta forma, quanto menor seu valor, mais homogêneos serão os dados. É calculada pela relação entre o desvio padrão e a média dos dados.

#### 7.4 COEFICIENTE DE HAZEM-WILLIAMS C

Através da pitometria é possível realizar análises e diagnósticos do estado físico da tubulação, como também a obtenção do coeficiente C da fórmula de Hazen-Williams, o qual permitiu analisar as condições físicas das tubulações.

Para tanto, foi necessário instalar duas estações pitométricas (EP) em um mesmo trecho da adutora, sendo garantido que não exista nenhum consumo ao longo deste percurso, ou seja, as vazões nas duas EPs são iguais. Assim, é possível, através da

diferença de pressão entre as EPs e do desnível entre as estações, obter a perda de carga total do trecho.

De posse da perda de carga, do diâmetro da tubulação, da vazão e do comprimento do trecho entre as duas EPs, é possível o cálculo do parâmetro C, da fórmula de Hazen-Williams, da adutora.

O parâmetro C foi calculado em apenas dois trechos da adutora do sistema Prata. A equação para o cálculo do coeficiente C pode ser vista na Equação 5 abaixo.

$$C = \sqrt[1,85]{\frac{10,64 * Q^{1,85} * L}{h_f * D^{4,87}}} \quad (5)$$

Em que:

- H<sub>f</sub> é a perda de carga (m);
- Q é a vazão (m<sup>3</sup>/s);
- C é o coeficiente de perda de carga de Hazen-Williams;
- L é o comprimento do trecho da tubulação (m);
- D é o diâmetro da tubulação (m).

## 7.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade, de forma sucinta, permite definir os fatores mais influentes em um sistema. Essa estuda o efeito das alterações na distribuição dos dados ou o impacto causado por alterações nos parâmetros. De uma forma geral, pode-se dizer que avalia o efeito que a variação de um dado de entrada pode ocasionar nas variáveis de estado e resultados. Nesse sentido, quando uma pequena variação em um parâmetro altera fortemente uma outra variável, diz-se que o modelo é sensível a este parâmetro.

Nesta pesquisa foi realizada uma análise de sensibilidade local que, de maneira simplificada, é utilizada para avaliar o efeito sobre os resultados do modelo da variação de apenas um dos parâmetros de entrada enquanto mantém os outros parâmetros constantes.

A análise de sensibilidade pode ser feita por meio de métodos:

- Matemáticos;
- Estatísticos;
- Gráficos.

De maneira simples, a análise realizada consiste em variar um parâmetro enquanto todos os outros permanecem fixos. Nesse sentido, na pesquisa, o coeficiente C foi variado e os outros parâmetros ficaram fixos. Deste modo, no EPANET, foi colocado manualmente os valores de C e, em seguida, foi feita a simulação. Após a simulação, se faz uma análise dos resultados de saída do modelo, que foram os valores de vazão. A variação e a simulação foram feitas para valores de C que variaram de 80 a 130 em intervalos de 10 em 10. Para complementar a análise, foram feitos gráficos para uma melhor visualização da sensibilidade entre as variáveis.

## **8 ANÁLISE DOS SISTEMAS QUANTO AO ATENDIMENTO DA DEMANDA DE CARUARU**

Sabe-se que, com o crescimento populacional, os sistemas de abastecimento estão cada vez maiores e mais complexos. As companhias de saneamento devem estar atentas a esse fator, pois precisam garantir a oferta de água para toda população. Inclusive esse é um dos objetivos de desenvolvimento sustentável enumerados pela Organização das Nações Unidas (ONU): Garantir a disponibilidade e a gestão sustentável da água potável e do saneamento para todos.

Neste sentido, a previsão do consumo de água e a projeção da população futura é fundamental para o planejamento e gerenciamento de um sistema de abastecimento de água (SSA), pois as operações, ampliações ou melhorias dos SAA estão diretamente associadas ao consumo de água.

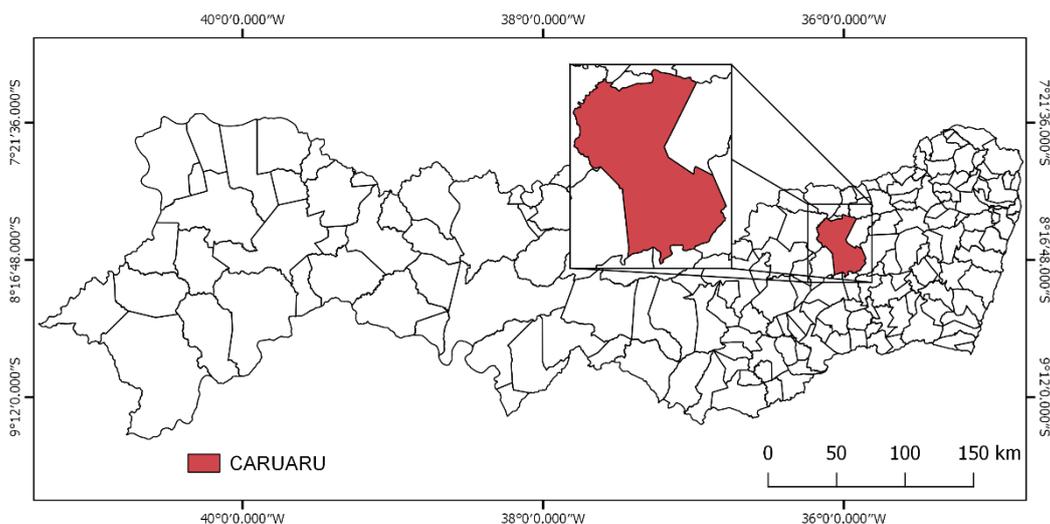
Destaca-se que o intuito não é dimensionar um sistema de abastecimento de água e sim saber se os sistemas são capazes de, isoladamente, atenderem a demanda da cidade de Caruaru-PE. Nesse sentido, busca-se saber as vazões de demanda e compará-las com as vazões obtidas no modelo hidráulico.

### **8.1 ESTUDO DE CASO**

O município de Caruaru, Mapa 5, está localizado na mesorregião Agreste e na Microrregião Vale do Ipojuca, do Estado de Pernambuco, limitando-se a norte com Toritama, Vertentes, Frei Miguelinho e Taquaritinga do Norte; a Sul com Altinho, Agrestina; a Leste com Bezerros e Riacho das Almas; a Oeste com Brejo da Madre de Deus e São Caetano (BRASIL, 2005a).

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2021), o município de Caruaru possui área territorial de 920,610 km<sup>2</sup>, com vegetação predominante é a caatinga, tendo remanescentes de mata atlântica. No último censo, 2010, a população era de 314.912 pessoas, a população estimada para o ano de 2021 foi de 369.343 pessoas. Está localizada a 08°17'00" de latitude sul e 35°58'34" de longitude oeste, dista 130 km da capital pernambucana, Recife.

Mapa 5 – Localização do município de Caruaru-PE.



Fonte: O Autor (2022).

O município encontra-se inserido, geologicamente, na Província Borborema e está inserido nos domínios das Bacias Hidrográficas dos Rios Ipojuca e Capibaribe. Por pertencer ao chamado polígono das secas, Caruaru apresenta um regime pluviométrico marcado por extrema irregularidade de chuvas, no tempo e no espaço. Portanto, a escassez hídrica é um forte entrave no que se refere ao desenvolvimento econômico.

O abastecimento da cidade de Caruaru está sob responsabilidade da Companhia Pernambucana de Saneamento. Até meados de 2015, Caruaru era uma das cidades abastecidas pela barragem de Jucazinho, porém devido à variação climática dos últimos anos, o que causou a escassez de chuvas em boa parte do Brasil, a disponibilidade hídrica ficou escassa. Como resultado, Jucazinho entrou no seu volume morto e em 2016, a COMPESA declarou o colapso da barragem.

Desde a difícil situação em que se encontrava a barragem de Jucazinho, o principal manancial passou a ser o Prata e, no ano de 2017, a cidade começou a ser abastecida também, como forma de preservar outros mananciais, pelo sistema Pirangi. Atualmente a cidade de Caruaru tem seu abastecimento de água fornecido pelos sistemas Jucazinho e Prata-Pirangi, além de outros pequenos mananciais que são responsáveis pelo abastecimento, principalmente, da zona rural.

Aqui será avaliado, de acordo com a modelagem, se os sistemas adutores de Jucazinho e Prata, sozinhos, são suficientes para o abastecimento da cidade de Caruaru atualmente e para um horizonte de projeto de 20 anos.

## 8.2 CONSUMO *PER CAPITA*

Pode-se, genericamente, dizer que o consumo *per capita* é a média diária usada, por indivíduos, dos volumes requeridos para satisfazer aos consumos domésticos, comercial, público e industrial, além das perdas do sistema.

De um modo geral, o consumo per capita de água pode ser determinado por meio de leitura dos hidrômetros e leitura de macromedidor instalado na saída dos reservatórios. E, na ausência de medição, a própria NBR 12211/92 diz que se pode adotar valores de consumo e seus coeficientes de variação de vazão encontrados em medições de setores ou sistemas semelhantes.

Conforme o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), o consumo *per capita* ( $Q_{pc}$ ) pode ser representado pela Equação 6:

$$Q_{pc} = \frac{\text{Volume de água consumido} - \text{Volume de água tratado exportado}}{\text{População total atendida com abastecimento de água}} \times \frac{1.000.000}{365} \quad (6)$$

Um fator importante e que deve ser analisado com cautela, porque deve constar no cálculo do consumo *per capita*, é a perda de água no SAA que deve ser incorporada no cálculo do consumo. A incorporação pode ser feita por meio da Equação 7:

$$Q_e = \frac{Q_{pc}}{1 - I_p} \quad (7)$$

Em que:

- $Q_e$  – Consumo efetivo *per capita* de água;
- $Q_{pc}$  – Consumo *per capita* de água;
- $I_p$  – Índice de perdas.

## 8.3 ESTUDO DA POPULAÇÃO FUTURA

Um SAA deve ser projetado para atender uma população de projeto. Geralmente, o horizonte de projeto varia entre 20 e 30 anos, sendo comum adotar 25 anos.

Para o estudo da população futura, alguns métodos podem ser utilizados:

- Método dos componentes demográficos;

- Métodos matemáticos;
  - Aritmético;
  - Geométrico;
  - Taxa decrescente de crescimento;
  - Curva logística.
- Métodos de extrapolação gráfica.

Nessa pesquisa, o método utilizado foi o método matemático, que pressupõe uma taxa de crescimento constante para os anos que se seguem, a partir de dados conhecidos, como, por exemplo, populações dos últimos censos. A população pelo método aritmético pode ser obtida pelas Equações 8 e 9.

$$P_t = P_0 + K_a * (t - t_0) \quad (8)$$

$$K_a = \frac{P_2 - P_0}{t_2 - t_0} \quad (9)$$

Em que:

- $K_a$  – Taxa de crescimento aritmético;
- $T_0$  – Ano inicial;
- $T$  – Ano em que quer saber a população futura;
- $T_2$  – Ano atual;
- $P_0$  – População inicial;
- $P_2$  – População atual;
- $P_t$  – População futura;

Por sua vez o método geométrico é o que ocorre, principalmente, em uma fase de crescimento acelerado, acompanhando praticamente uma curva exponencial. Pode ser obtido por meios das Equações 10 e 11.

$$P_t = P_0 * e^{k_g * (t - t_0)} \quad (10)$$

$$k_g = \frac{\ln P_2 - \ln P_0}{t_2 - t_0} \quad (11)$$

Em que:

- $K_g$  – Taxa de crescimento geométrico;
- $T_0$  – Ano inicial;
- $T$  – Ano em que quer saber a população futura;
- $T_2$  – Ano atual;
- $P_0$  – População inicial;
- $P_t$  – População futura;
- $P_2$  – População atual;

Já o método da Taxa de Crescimento Decrescente, pressupõe que, na medida que a cidade cresce, a taxa de crescimento torna-se menor. As Equações 12, 13 e 14 representam o método citado.

$$P_t = P_0 + (P_s - P_0) * [1 - e^{-k_d*(t-t_0)}] \quad (12)$$

$$P_s = \frac{2*P_0*P_1*P_2 - P_1^2(P_0 + P_2)}{P_0*P_2 - P_1^2} \quad (13)$$

$$k_d = \frac{\ln\left[\frac{(P_s - P_2)}{(P_s - P_0)}\right]}{(t_2 - t_0)} \quad (14)$$

Em que:

- $K_d$  – Taxa de crescimento decrescente;
- $T_0$  – Ano inicial;
- $T$  – Ano da população futura;
- $T_2$  – Ano atual;
- $P_0, P_1$  e  $P_2$  – Populações nos anos  $T_0, T_1$  e  $T_2$  do censo;
- $P_t$  – população futura;
- $P_s$  – população de saturação;

Por fim, o método da curva logística, o crescimento segue uma relação matemática, que estabelece uma curva suavizada de S. A curva é representada por três fases nas quais a fase 1, o crescimento é rápido quando a população é pequena em relação aos recursos originais; a fase 2, o crescimento é linear em virtude de uma relação menos

favorável entre os recursos econômicos e a população; já a fase 3, a taxa de crescimento decresce com o núcleo urbano aproximando-se do limite de saturação, tendo em vista a redução dos recursos e da área de expansão. Abaixo, de 15 a 18, estão enumeradas as equações da curva logística.

$$P_t = \frac{P_s}{1 + c * e^{k_i(t-t_0)}} \quad (15)$$

$$P_s = \frac{2 * P_0 * P_1 * P_2 - P_1^2 (P_0 + P_2)}{P_0 * P_2 - P_1^2} \quad (16)$$

$$K_i = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \ln \left[ \frac{P_0 * (P_s - P_1)}{P_1 * (P_s - P_0)} \right] \quad (17)$$

$$c = \frac{(P_s + P_0)}{P_0} \quad (18)$$

#### 8.4 CÁLCULO DA DEMANDA

De acordo com as informações de população e consumo *per capita* efetivo, pode-se calcular, a partir da Equação 19, o valor de vazão da demanda (Q) em litros por segundo.

$$Q = \frac{Q_e * População}{86400} \quad (19)$$

## 9 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Diante do modelo construído e da finalização da calibração, pode-se, agora, explorá-lo. Para Rossman (2009), a utilização mais imediata de um modelo é o aprofundamento do conhecimento sobre o funcionamento do sistema modelado.

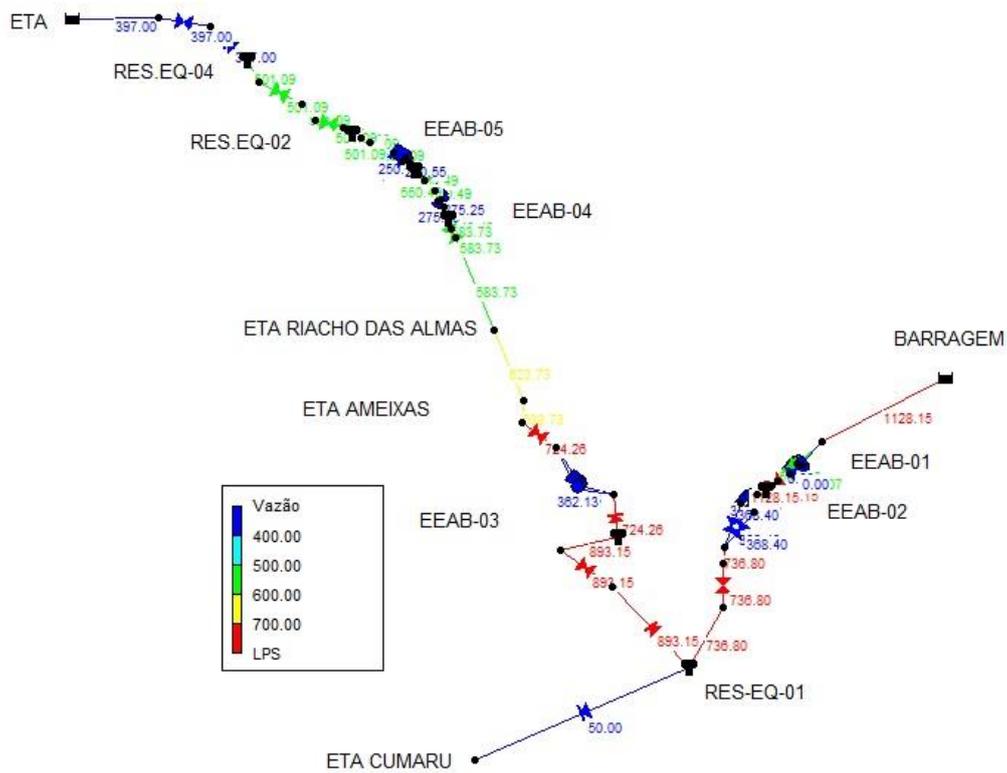
Como os reservatórios na extremidade, das pontas, são de nível fixo (RNF), não foram feitas simulações dinâmicas, pois esta simulação não mudaria os resultados. Do mesmo modo, como os reservatórios intermediários, poços de sucção, não possuem demandas, não foram feitas simulações dinâmicas entre os reservatórios.

Desta forma, a análise realizada não pretende ser exaustiva, pois existem várias simulações a serem feitas em cenários diferentes, mas sim uma forma de mostrar a abordagem do modelo para compreender o funcionamento do sistema.

### 9.1 MODELAGEM HIDRÁULICA

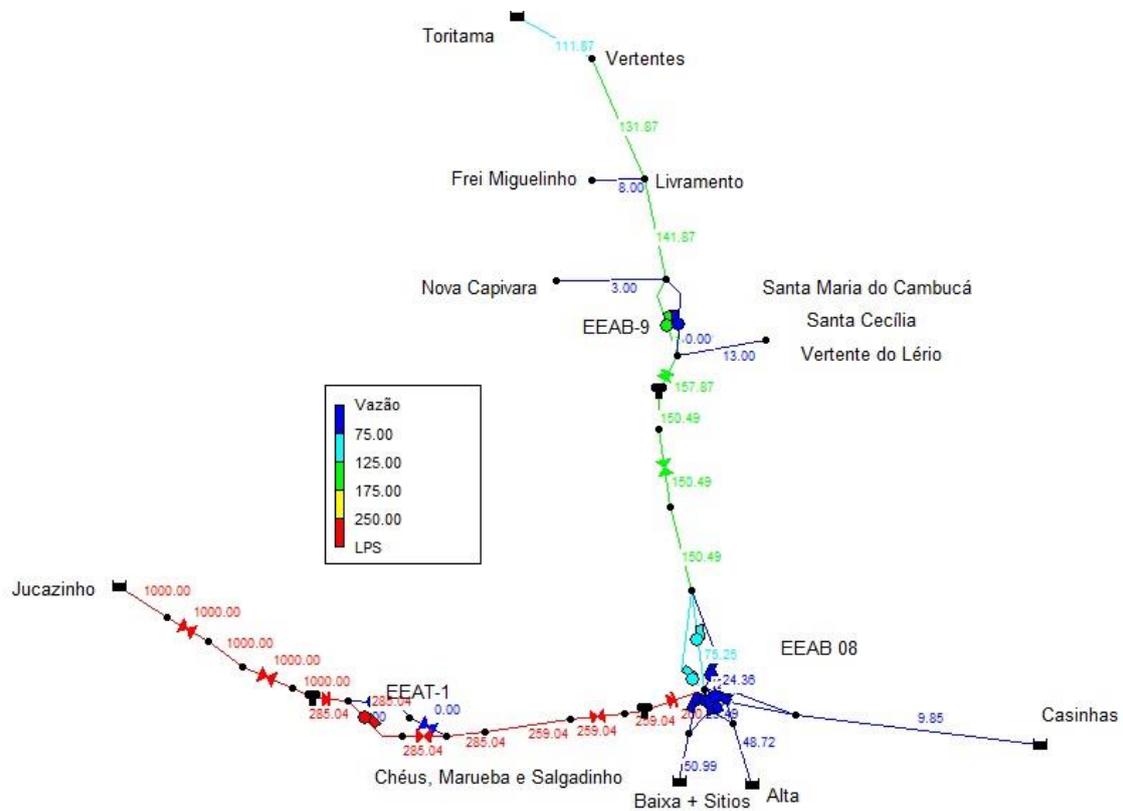
Em um primeiro momento da fase de análise de resultados, mostra-se uma descrição genérica dos sistemas adutores. Diante da construção do modelo e de sua respectiva calibração, a própria modelagem já se mostra um resultado para o referido trabalho. As Figuras 11 a 15 apresentam as simulações bem sucedidas dos sistemas.

Figura 11 – Simulação do Tramo Sul do sistema adutor de Jucazinho.



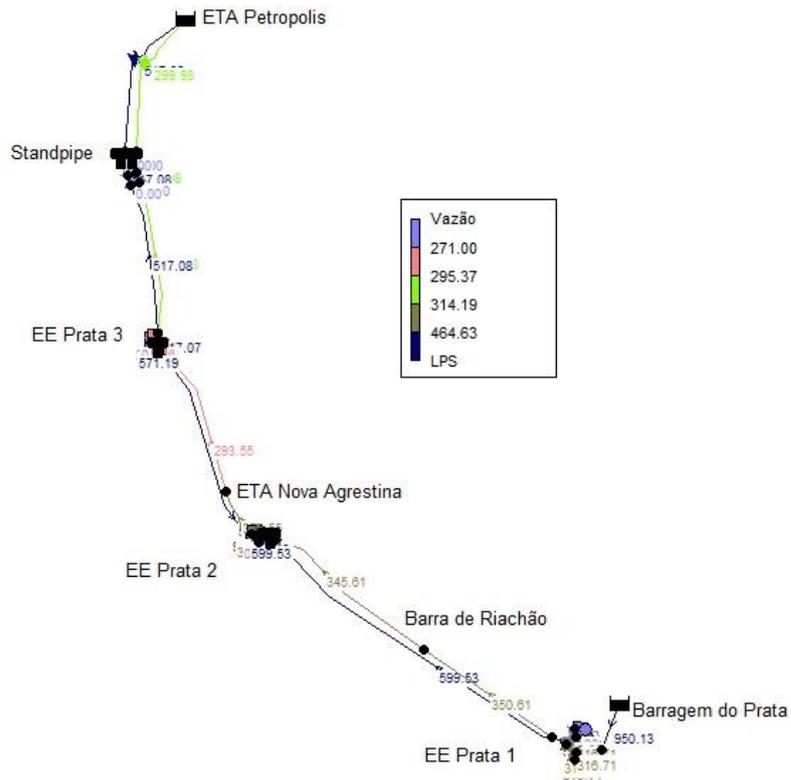
Fonte: O Autor (2022).

Figura 12 – Simulação do Tramo Norte do sistema adutor de Jucazinho.



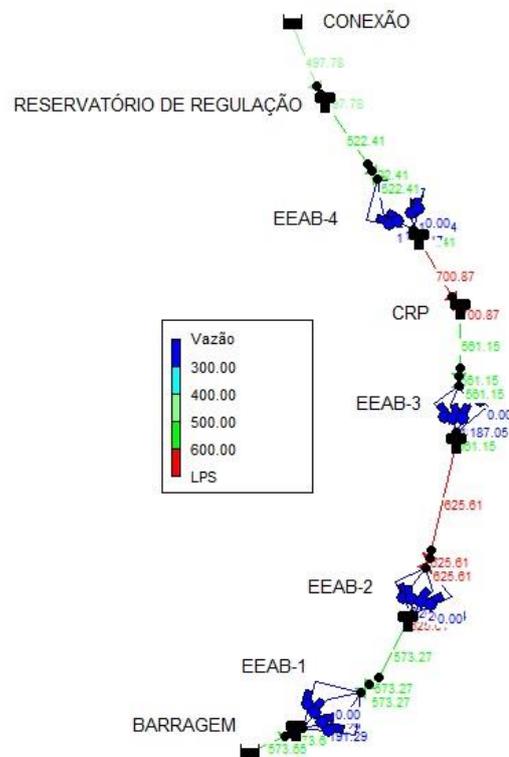
Fonte: O Autor (2022).

Figura 13 – Simulação do sistema adutor Prata.



Fonte: O Autor (2022).

Figura 14 – Simulação do sistema adutor Serro Azul.



Fonte: O Autor (2022).



Para as elevatórias do sistema Prata, utilizou-se os dados fornecidos pela pitometria para a elaboração das curvas características. Vale destacar que, devido à limitação no levantamento dos pontos de operação para cada conjunto motor-bomba e a proximidade dos valores obtidos de vazão e pressão, optou-se por utilizar na modelagem um único ponto de operação para determinar a curva característica. Desta forma, considera-se que os conjuntos motor-bomba são iguais.

Portanto, para a EEAB-1, o ponto de operação cadastrado no modelo hidráulico, para a curva característica das bombas foi baseado nos dados nominais informados na plaqueta das bombas, pois os dados de pitometria não podiam ser segregados, por estarem com valores muito próximos, para cada bomba ou estavam incoerentes. Deste modo, o ponto de operação foi [316,7 L/s; 155 mca].

Os pontos de operação dos conjuntos motor-bomba das estações elevatórias 2 e 3, foram obtidas por meio das medições pitométricas. Devido à proximidade das curvas características dos conjuntos optou-se por utilizar, na modelagem, uma única curva para cada conjunto motor-bomba. Desta forma, considera-se que as bombas são iguais.

Portanto, para a estação elevatória 2 e 3, os pontos de operação cadastrados nos modelos foram [378,2 L/s; 140,1 mca] e [349,5 L/s; 134,7 mca], respectivamente. Estes valores podem ser observados nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9 – Dados de pitometria da EEAB-2 do sistema adutor Prata.

<b>Local da pitometria</b>	<b>ID CMB</b>	<b>Data</b>	<b>Vazão (L/s)</b>	<b>AMT (mca)</b>	<b>Status do registro</b>
EEAB-2	1	29/10/21	349,7	141,4	Aberto
EEAB-2	3	29/10/21	406,7	138,8	Aberto
Valores médios	-	-	<b>378,2</b>	<b>140,1</b>	-

Fonte: O Autor (2022).

Tabela 10 – Dados de pitometria da EEAB-3 do sistema adutor Prata.

<b>Local da pitometria</b>	<b>ID CMB</b>	<b>Data</b>	<b>Vazão (L/s)</b>	<b>AMT (mca)</b>	<b>Status do registro</b>
EEAB-3	2	29/10/21	334,47	134,64	Estrangulado
EEAB-3	3	29/10/21	364,59	134,80	Aberto
Valores médios	-	-	<b>349,5</b>	<b>134,7</b>	-

Fonte: O Autor (2022).

A Tabela 11 mostra a análise efetuada das vazões dos trechos do modelo das leituras pitométricas. O histórico operacional do sistema adutor demonstra que a EEAB-2 possui vazão superior à da EEAB-1 e da EEAB-3, o que também foi apontado pela modelagem hidráulica. Os valores abaixo foram simulados com valor de Coeficiente C igual a 100.

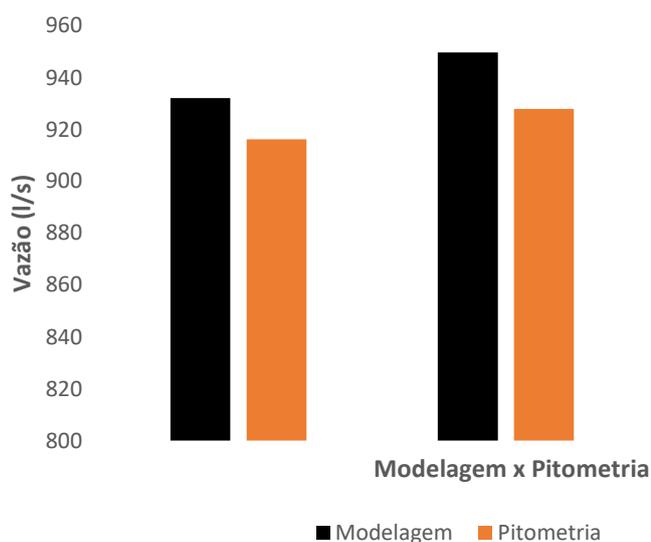
Tabela 11 – Comparativo de vazões determinadas pelo modelo hidráulico e a pitometria para o sistema adutor Prata.

Trecho	Vazão modelada (L/s)	Vazão pitometria (L/s)
Saída EEAB-1	950,1	916,2
Saída EEAB-2	949,7	927,9
Saída EEAB-3	817,1	824,6

Fonte: O Autor (2022).

A fim de se ter noção da semelhança entre os valores apresentados na tabela acima, o Gráfico 2 mostra, a partir de um gráfico, a semelhança entre os dados analisados.

Gráfico 2 – Análise gráfica da relação existente entre os valores da modelagem e da pitometria.



Fonte: O Autor (2022).

### 9.2.2 Sistema adutor de Jucazinho, Tramo Sul

Para o sistema adutor Jucazinho, Tramo Sul, não foi possível realizar um levantamento pitométrico padrão para obtenção das curvas características das bombas, entretanto, foi disponibilizado, pela COMPESA, um levantamento pitométrico feito pela

própria companhia, realizada no dia 11/10/2021, no tramo sul e, a partir dos dados disponibilizados, pode-se observar que o modelo apresenta um comportamento consideravelmente similar ao sistema adutor.

Na EEAB-1 foram realizadas medições nos conjuntos motor-bomba 3 e 4. Como os valores provenientes da análise pitométrica são próximos para os dois conjuntos, optou-se por adotar uma única curva característica para todos os conjuntos da estação elevatória. Desta forma, considera-se que as bombas são iguais. O ponto de operação, cadastrado no modelo hidráulico, para a curva característica das bombas da EEAB-1 foi [529,5 L/s; 133 mca]. Os valores considerados são valores médios obtidos da pitometria. Nos pontos em que foram consideradas valores de dois conjuntos motor-bomba os valores de vazão foram divididos para as duas bombas. O ponto de operação foi determinado com base nas medições realizadas em 11/10/2021 descritas na Tabela 12.

Tabela 12 – Dados de pitometria da EEAB-1, Tramo Sul.

<b>Local da pitometria</b>	<b>ID CMB</b>	<b>Data</b>	<b>Vazão (L/s)</b>	<b>AMT (mca)</b>	<b>Status do registro</b>
EEAB-1	3	11/10/21	574	127	Aberto
EEAB-1	3 + 4	11/10/21	970	139	Aberto
<b>Valores médios</b>	-	-	<b>529,5</b>	<b>133</b>	-

Fonte: O Autor (2022).

Na EEAB-2, foram realizadas medições nos conjuntos motor-bomba 1 e 4. Da mesma forma que na EEAB-1, as medições pitométricas apresentaram valores bem próximos. Desta forma, mais uma vez, optou-se por adotar uma única curva característica para todos os conjuntos da estação elevatória. Neste sentido, foi considerado que as bombas são iguais. O ponto de operação, cadastrado no modelo hidráulico, para a curva característica das bombas da EEAB-2 foi [388,5 L/s; 114 mca]. Os valores considerados são valores médios obtidos da pitometria. Nos pontos em que foram consideradas valores de dois conjuntos motor-bomba os valores de vazão foram divididos para as duas bombas. O ponto de operação foi determinado com base nas medições realizadas em 11/10/2021 descritas na Tabela 13.

Tabela 13 – Dados de pitometria da EEAB-2, Tramo Sul.

<b>Local da pitometria</b>	<b>ID CMB</b>	<b>Data</b>	<b>Vazão (L/s)</b>	<b>AMT (mca)</b>	<b>Status do registro</b>
EEAB-2	1	11/10/21	404	112	Aberto
EEAB-2	1 + 4	11/10/21	746	116	Aberto
<b>Valores médios</b>	-	-	<b>388,5</b>	<b>114</b>	-

Fonte: O Autor (2022).

De forma semelhante ao procedimento realizado para as estações 1 e 2, na EEAB-3 foram realizadas medições nos conjuntos 1 e 2. Mais uma vez, as medições pitométricas revelaram valores próximos para os conjuntos. Com isso, optou-se por adotar uma única curva característica para os conjuntos considerando assim que as bombas são iguais. O ponto de operação, cadastrado no modelo hidráulico, para a curva característica das bombas da EEAB-3 foi [436,8 L/s; 106,3 mca]. Os valores considerados são valores médios obtidos da pitometria. Nos pontos em que foram consideradas valores de dois conjuntos motor-bomba os valores de vazão foram divididos para as duas bombas. O ponto de operação foi determinado com base nas medições realizadas em 11/10/2021 descritas na Tabela 14.

Tabela 14 – Dados de pitometria da EEAB-3, Tramo Sul.

<b>Local da pitometria</b>	<b>ID CMB</b>	<b>Data</b>	<b>Vazão (L/s)</b>	<b>AMT (mca)</b>	<b>Status do registro</b>
EEAB-3	1	11/10/21	433	99	Aberto
EEAB-3	2	11/10/21	450	101	Aberto
EEAB-3	1 + 2	11/10/21	855	119	Aberto
<b>Valores médios</b>	-	-	<b>436,8</b>	<b>106,3</b>	-

Fonte: O Autor (2022).

Para EEAB-4, os procedimentos foram os mesmos descritos acima e as medições foram realizadas nos conjuntos 1 e 2. Na Tabela 15 estão os valores para a referida estação elevatória.

Tabela 15 – Dados de pitometria da EEAB-4, Tramo Sul.

<b>Local da pitometria</b>	<b>ID CMB</b>	<b>Data</b>	<b>Vazão (L/s)</b>	<b>AMT (mca)</b>	<b>Status do registro</b>
EEAB-4	1	11/10/21	329	90	Aberto
EEAB-4	2	11/10/21	298	90	Aberto
<b>Valores médios</b>	-	-	<b>314</b>	<b>90</b>	-

Fonte: O Autor (2022).

Para a determinação da curva característica das bombas da EEAB-5, foram utilizadas medições de vazões realizadas na chegada do EQ-2 para os conjuntos motor-bomba 2 e 4. O procedimento foi o mesmo descrito para as estações elevatórias anteriores. Os valores podem ser vistos na Tabela 16.

Na Tabela 17 pode ser visto a análise das vazões dos trechos do modelo e as provenientes das leituras pitométricas. Os valores abaixo foram modelados com valor de Coeficiente C igual a 90.

Tabela 16 – Dados de pitometria da EEAB-5, Tramo Sul.

<b>Local da pitometria</b>	<b>ID CMB</b>	<b>Data</b>	<b>Vazão (L/s)</b>	<b>Status do registro</b>
Chegada do EQ-2	2	09/02/21	266,9	Aberto
Chegada do EQ-2	4	09/02/21	258,8	Aberto
Chegada do EQ-2	4 + 2	09/02/21	499,6	Aberto
<b>Valores médios</b>	-	-	<b>258,5</b>	-

Fonte: O Autor (2022).

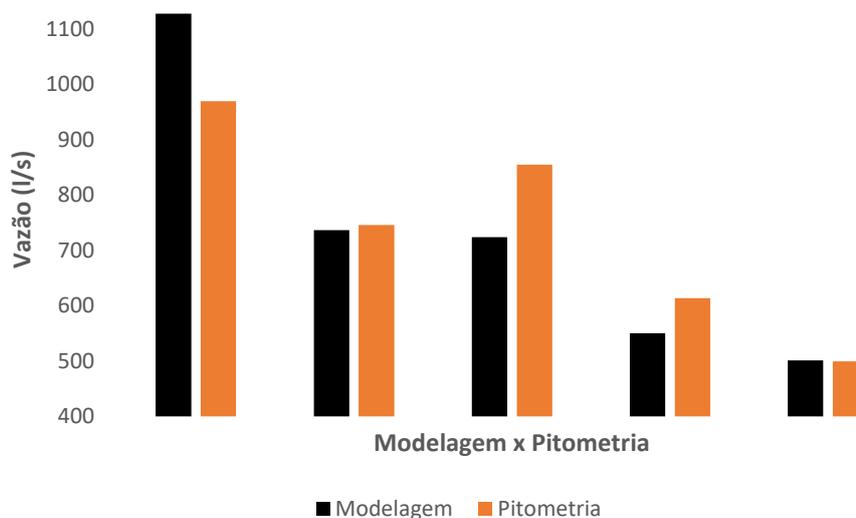
Tabela 17 – Vazões determinadas pelo modelo hidráulico e pelo levantamento pitométrico, Tramo Sul.

<b>Trechos</b>	<b>Vazão modelada (L/s)</b>	<b>Vazão pitometria (L/s)</b>
Saída EEAB-1	1.128,1	970,0
Saída EEAB-2	736,8	746,0
Saída EEAB-3	724,26	855,0
Saída EEAB-4	550,5	614,0
Chegada EQ-2	501,1	499,6

Fonte: O Autor (2022).

A fim de mostrar a semelhança entre os valores modelados e medidos, o Gráfico 3 mostra, a partir de um gráfico, a semelhança entre os valores analisados.

Gráfico 3 – Análise gráfica da relação existente entre os valores da modelagem e da pitometria – Tramo Sul do sistema adutor Jucazinho.



Fonte: O Autor (2022).

### 9.2.3 Sistema adutor de Jucazinho, Tramo Norte

Para o tramo Norte, foi disponibilizado, pela COMPESA, os dados pitométricos realizado no dia 06/07/2021. A EEAT-1 de Jucazinho possui conjuntos motor-bomba que abastecem o tramo Norte e Sul.

No tramo Norte, a EEAT-1 possui 2 conjuntos motor-bomba, sendo um reserva. Para estes conjuntos, foram utilizados dados nominais de projeto fornecido pela própria COMPESA, já que os dados de pitometria não compreendem esses conjuntos. Deste modo, o ponto de operação da curva é o ponto de projeto [290,94 L/s; 210 mca].

O mesmo procedimento foi usado para a EEAB-8 que abastece as localidades de Casinhas e Surubim (parte alta e baixa). Dessa forma, os pontos utilizados foram os dados nominais de projeto. Os pontos utilizados foram os descritos abaixo na Tabela 18.

Tabela 18 – Dados nominais de projeto da EEAB-8 para Casinhas e Surubim parte alta e baixa.

Local	Vazão (L/s)	Pressão (mca)
EEAB-8 – Casinhas	10,28	210
EEAB-8 – Surubim parte Baixa	51,74	23
EEAB-8 – Surubim parte Alta	66,55	40

Fonte: O Autor (2022).

Os conjuntos motor-bomba da EEAB-8 que aduzem água para a EEAB-9 foram modelados com uma única curva característica devido aos dados serem próximos. Deste modo, considera-se que as bombas são iguais. O ponto de operação, cadastrado no modelo hidráulico, para a curva característica das bombas da EEAB-8 foi [119 L/s; 88 mca]. Os valores considerados são valores médios obtidos da pitometria. Nos pontos em que foram consideradas valores de dois conjuntos motor-bomba os valores de vazão foram divididos para as duas bombas. O ponto de operação foi determinado com base nas medições realizadas em 06/07/2021 descritas na Tabela 19.

Tabela 19 – Dados de pitometria EEAB-8, Tramo Norte.

<b>Local da pitometria</b>	<b>ID CMB</b>	<b>Data</b>	<b>Vazão (L/s)</b>	<b>AMT (mca)</b>	<b>Status do registro</b>
EEAT-8	8	06/07/21	120	71	Aberto
EEAT-8	9	06/07/21	132	72	Aberto
EEAT-8	8 + 9	06/07/21	209	121	Aberto
<b>Valores médios</b>	-	-	<b>119</b>	<b>88</b>	-

Fonte: O Autor (2022)

Com relação à modelagem da EEAB-9, as demandas das localidades de Santa Maria do Cambucá, Vertente do Lério e Santa Cecília foram inseridas no modelo com um nó com demanda igual a 13 L/s. Logo, as estações elevatórias responsáveis pelo fornecimento de água para essas localidades não foram modeladas devido ao pequeno porte.

Por outro lado, os conjuntos motor-bomba da EEAB-9 que aduzem água para Toritama foram modelados com curvas características diferentes, pois os valores obtidos em capo possuem diferenças significativas. O ponto de operação cadastrado no modelo hidráulico, para a curva característica dos conjuntos motor-bomba 2 e 3, foram [144 L/s; 52 mca] e [84 L/s; 38 mca], respectivamente.

Na Tabela 20 apresenta-se a análise efetuada das vazões dos trechos do modelo e as leituras pitométricas. Os valores abaixo foram simulados com valor de Coeficiente C igual a 130.

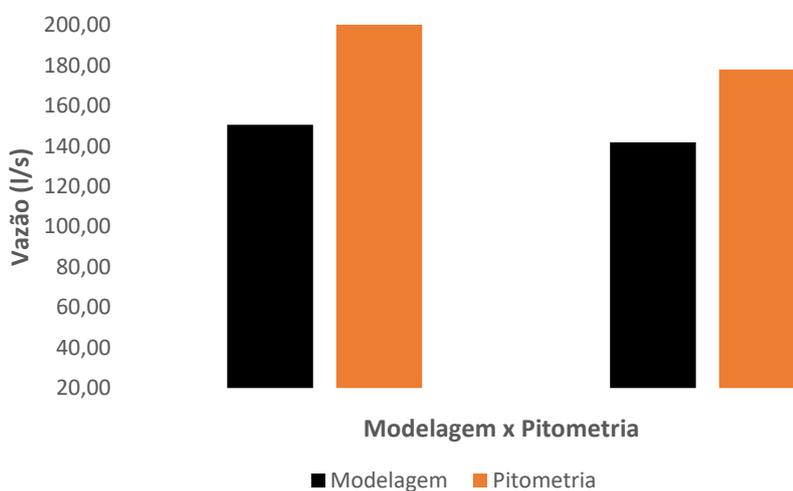
Tabela 20 – Comparativo entre as vazões determinadas no modelo e as obtidas com o levantamento pitométrico – Tramo Norte do sistema adutor Jucazinho.

Trecho	Vazão modelada (L/s)	Vazão pitometria (L/s)
Saída EEAT-8	150,5	208,6
Saída EEAT-9	144,9	178,0

Fonte: O Autor (2022).

A fim de mostrar a semelhança entre os valores modelados e medidos, o Gráfico 4 mostra, a partir de um gráfico, a semelhança entre os valores analisados.

Gráfico 4 – Análise gráfica da relação existente entre os valores da modelagem e da pitometria – Tramo Norte do sistema adutor Jucazinho.

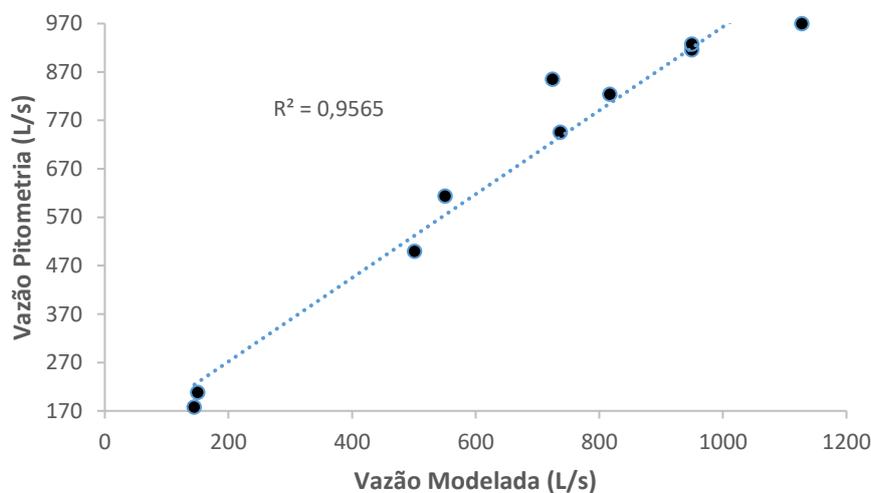


Fonte: O Autor (2022).

A fim de verificar a semelhança entre os valores de vazão modelado e os obtidos nas análises pitométricas, foi feita uma análise de correlação, a partir do coeficiente de correlação de Pearson (R), para saber o grau de similaridade entre as variáveis.

Deste modo o Gráfico 5 e a Tabela 21 mostram os resultados obtidos. Nota-se pelos resultados que existe uma correlação forte e próxima de 1.

Gráfico 5: Gráfico de dispersão da relação entre os valores de vazão modelado e os obtidos da análise pitométrica.



Fonte: O Autor (2022)

Tabela 21 – Correlação entre os valores de vazão dos modelos e da pitometria.

Sistema	Local	Vazão modelada (L/s)	Vazão pitometria (L/s)
Jucazinho – Sul	EEAB-1	1128,1	970
	EEAB-2	736,8	746
	EEAB-3	724,26	855
	EEAB-4	550,5	614
	EEAB-5	501,1	499,6
Jucazinho – Norte	EEAT-8	150,5	208,6
	EEAT-9	144,9	178
Prata	EEAB-1	950,1	916,2
	EEAB-2	949,7	927,9
	EEAB-3	817,1	824,6
<b>Média</b>		<b>665,31</b>	<b>673,99</b>
<b>N</b>	<b>10</b>		
<b>Cov</b>	<b>85.008,82</b>		
<b><math>\sigma^2</math> mod</b>	<b>98.378,59</b>		
<b><math>\sigma^2</math> pit</b>	<b>76.799,59</b>		
<b><math>\sigma</math> mod</b>	<b>313,65</b>		
<b><math>\sigma</math> pit</b>	<b>277,13</b>		
<b>CV mod (%)</b>	<b>47,14</b>		
<b>CV pit (%)</b>	<b>41,12</b>		
<b>R</b>	<b>0,9780</b>		
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0,9565</b>		

Fonte: O Autor (2022)

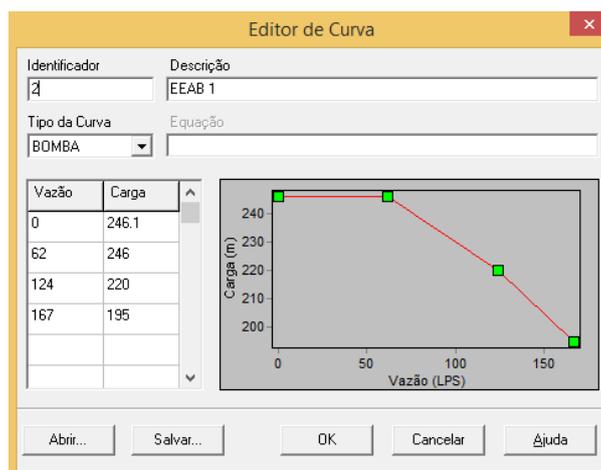
### 9.2.4 Sistema adutor Alto Capibaribe

Para o sistema adutor do Alto Capibaribe, a modelagem ocorreu por meio da utilização de dados de projeto. Conforme esperado, a partir dos dados indicados em projeto, foi possível verificar que o modelo consegue um comportamento consideravelmente idêntico ao do sistema adutor em vazão.

As duas elevatórias, a primeira com bombas anfíbias de captação em canal, e a segunda, uma elevatória de percurso, pertencentes ao sistema adutor do Alto Capibaribe tiveram seus pontos de bomba com base nas curvas dos fabricantes. A curva característica da EEAB-1 já foi apresentada na Figura 10, por sua vez, a curva característica da EEAB-2 é apresentada na Figura 16.

Como, para o sistema adutor em questão, foram utilizados dados de projeto e o sistema ainda não se encontra em funcionamento, não foram feitas as análises gráficas.

Figura 16 – Curva característica da estação elevatória de captação do sistema Alto Capibaribe.



Fonte: O Autor (2022).

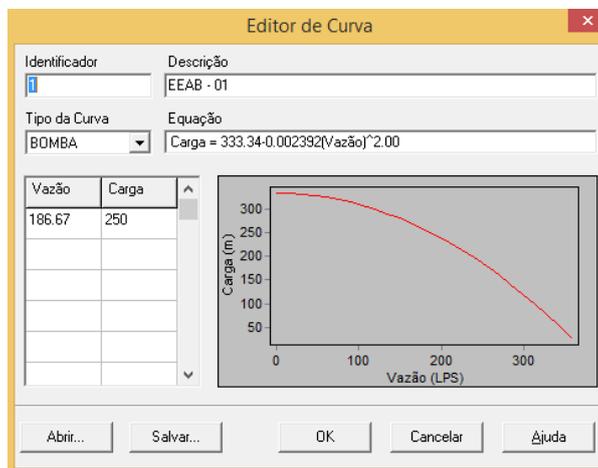
### 9.2.5 Sistema adutor Serro Azul

Para o sistema adutor de Serro Azul, a modelagem ocorreu por meio da utilização de dados de projeto. A partir dos dados indicados em projeto foi possível verificar que o modelo consegue um comportamento consideravelmente idêntico ao do sistema adutor em vazão.

As quatro elevatórias tiveram curvas características definidas a partir de dados baseados nas curvas do fabricante. Com a finalidade de observação do comportamento

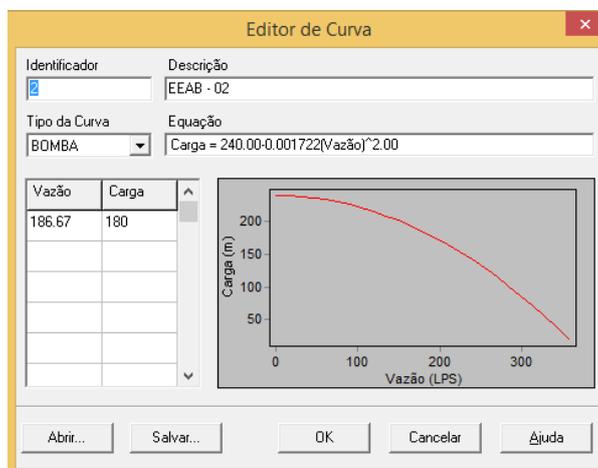
das curvas características do sistema adutor de Serro azul, as Figuras 17 e 18, mostram, em ambiente EPANET, o comportamento das curvas das estações elevatórias 1 e 2, respectivamente.

Figura 17 – Curva característica da EEAB-1 do sistema adutor Serro Azul.



Fonte: O Autor (2022).

Figura 18 – Curva característica da EEAB-2 do sistema adutor Serro Azul.



Fonte: O Autor (2022).

### 9.3 COEFICIENTE DE HAZEM-WILLIAMS C

O único sistema que foi possível o cálculo do coeficiente C, a partir dos dados pitométricos levantados pela COMPESA, foi o do sistema adutor Prata e foi calculado em apenas dois trechos, Da EEAB-1 para EEAB-2 e da EEAB-2 para EEAB-3. Apesar de serem dois trechos, contabiliza-se quatro adutoras devido ao fato de o sistema Prata possuir adutoras em paralelo.

Para o cálculo do coeficiente C, são necessários os dados apresentados na Equação 5. Para o cálculo da perda de carga são necessários valores de cota geométrica dos pontos de medição de entrada e saída e suas pressões na entrada e na saída. Os valores de C calculados nos trechos são apresentados nas tabelas 22 e 23.

Tabela 22 – Cálculo do coeficiente C, trecho 1-2 do sistema Prata, diâmetros nominais 600 e 500.

Parâmetros	Unidade	Valores	Parâmetros	Unidade	Valores
Z <sub>1</sub>	m	384,42	Z <sub>1</sub>	m	384,42
P <sub>1</sub>	mca	167	P <sub>1</sub>	mca	167
Z <sub>2</sub>	m	438,68	Z <sub>2</sub>	m	438,68
P <sub>2</sub>	mca	6,9	P <sub>2</sub>	mca	6,9
H <sub>f</sub>	m/m	105,84	H <sub>f</sub>	m/m	105,84
L	m	12150	L	m	12150
Q <sub>600</sub>	m <sup>3</sup> /s	0,545	Q <sub>500</sub>	m <sup>3</sup> /s	0,3712
D <sub>600</sub>	m	0,615	D <sub>500</sub>	m	0,500
<b>C<sub>600</sub></b>	-	<b>91,4</b>	<b>C<sub>500</sub></b>	-	<b>107,3</b>

Fonte: O Autor (2022).

Tabela 23 – Cálculo do coeficiente C, trecho 2-3 do sistema Prata, diâmetros nominais 600 e 500.

Parâmetros	Unidade	Valores	Parâmetros	Unidade	Valores
Z <sub>2</sub>	m	438,68	Z <sub>2</sub>	m	438,68
P <sub>2</sub>	mca	233	P <sub>2</sub>	mca	233
Z <sub>3</sub>	m	514,43	Z <sub>3</sub>	m	514,43
P <sub>3</sub>	mca	6,7	P <sub>3</sub>	mca	6,7
H <sub>f</sub>	m/m	150,55	H <sub>f</sub>	m/m	150,55
L	m	9800	L	m	9800
Q <sub>600</sub>	m <sup>3</sup> /s	0,542	Q <sub>500</sub>	m <sup>3</sup> /s	0,3856
D <sub>600</sub>	m	0,615	D <sub>500</sub>	m	0,500
<b>C<sub>600</sub></b>	-	<b>66,88</b>	<b>C<sub>500</sub></b>	-	<b>82,04</b>

Fonte: O Autor (2022).

Com os valores obtidos acima foi feita nova simulação para comparação entre os valores modelados e os advindos da análise pitométrica. Os valores do Coeficiente C, dos trechos que não foi possível fazer o cálculo, foram iguais a 100. A Tabela 24, que é uma adaptação da Tabela 11, apresenta os valores abaixo.

Tabela 24 – Comparativo de vazões determinadas pelo modelo hidráulico e a pitometria para o sistema adutor Prata calculados com os valores de C.

Trecho	Vazão modelagem (L/s)	Vazão pitometria (L/s)
Saída EEAB-1	933,11	916,2
Saída EEAB-2	753,74	927,9
Saída EEAB-3	817,02	824,6

Fonte: O Autor (2022).

Nota-se a partir da Tabela 24 que os dados modelados para a EEAB-2 não estão próximos aos obtidos a partir da pitometria. Por esse motivo, os valores de C utilizados na modelagem não foram os valores calculados, mas sim o valor igual a 100, que são os resultados apresentados na Tabela 11.

Nos casos nos quais não foi possível o cálculo do coeficiente C, este parâmetro foi introduzido por meio da função do tipo de material e idade das adutoras. Devido ao desconhecimento do estado das adutoras e por ser um valor tabelado, foi realizada consulta no site da empresa Saint-Gobain (<https://www.sgpam.com.br/artigos/perdas-de-carga>). Para a modelagem da adutora do Alto do Capibaribe, a equação de Hazen-Williams foi substituída, no EPANET, pela equação universal (Darcy-Weisbach), já que o projeto fornece o valor do coeficiente de rugosidade dos tubos.

Observa-se que alguns valores de calibração obtidos nas Seções 9.2 e 9.3 não correspondem, exatamente, ao valor real do sistema, ou seja, existe uma diferença entre os valores registrados e os calculados. No entanto, essas diferenças encontram-se dentro de uma margem de erro aceitável. Isso pode ser visto no cálculo do coeficiente de correlação que são bem próximos de 1.

Numa análise mais detalhada, algumas diferenças entre o modelo e a realidade podem ser justificadas pelo fato de o sistema real, em funcionamento, passar por oscilações, isto é, o controle operacional de alguns equipamentos como válvulas reguladoras de vazão, válvulas reguladoras de pressão não estarem imunes a falhas operacionais. Além disso, grupos motor-bomba, devido ao seu uso, podem estar desgastados e não ser possível simular fielmente o estado de conservação interno das adutoras.

Portanto, como o modelo hidráulico, é um modelo matemático, não há como simular esses tipos de falhas. Desta forma, modelos matemáticos de sistemas adutoras de grande complexidade nunca representarão exatamente os parâmetros hidráulicos observados no sistema real.

#### 9.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – RELAÇÃO C X VAZÃO

Ainda em relação ao coeficiente C, foi feita uma análise da sua relação com a vazão. Esta análise tem o objetivo de saber como o modelo e a vazão se comportam ao se variar o coeficiente C, sendo importante para avaliar a importância do levantamento do coeficiente C em campo. Pelos resultados encontrados, observa-se que o C não interfere muito nos resultados encontrados. Uma explicação para isso é que nos sistemas avaliados, nos pontos em que se podia calcular o coeficiente, o desnível geométrico é muito grande. Assim, pode-se inferir que a perda de carga em relação à altura geométrica também tem pouca influência, ou seja, para essa análise, as cotas geométricas influenciam muito mais que as perdas de cargas.

Portanto, ao executar a simulação para valores diferentes de C, obtemos os valores de vazão aduzidos em cada estação elevatória. Nos Gráficos de 6 a 9, observa-se que as simulações para os diferentes valores de C fazem com que a vazão tenha seus valores aumentados, mostrando assim a relação de proporcionalidade entre os parâmetros.

Para o Tramo Sul, Gráfico 6, essa variação é, no geral, pequena. A maior variação encontra-se na EEAB-3, em que há uma variação de 23,2% entre os resultados com valores de C de 80 e 130. Ou seja, o referido coeficiente tem pouca influência no resultado. Essa simulação leva em consideração o funcionamento de duas bombas. As simulações foram feitas com diferentes valores de C, que vão de 80 a 130, em intervalos de 10 em 10 e considerando duas bombas em funcionamento.

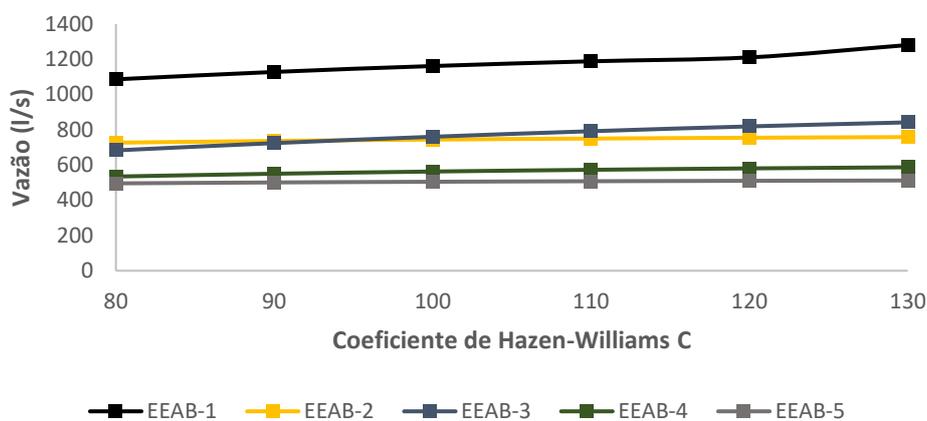
Para o tramo Norte, Gráfico 7, a variação também é pequena para a EEAB-1 e alta para as demais, observando-se a variação percentual máxima de 39% na EEAB-8. Isso mostra que o Coeficiente C pode ter influência nos resultados. Nesse sistema, não há na imagem o valor de C igual a 80, pois ao simular essas condições, foi gerado um relatório com mensagens de advertências. Portanto, foram utilizados valores de C que variam de 10 em 10 entre 90 e 130. Ademais, foi considerado para EEAB-1 apenas uma bomba em funcionamento e para a EEAB-8, que aduz água para EEAB-9, e para a EEAB-9, que aduz água para a cidade de Toritama, duas bombas em funcionamento.

Por sua vez, o sistema Prata, Gráfico 8, a variação dos valores é maior do que os outros sistemas analisados. Entre os valores a variação percentual é pequena, porém nota-se que na EEAB-3, por exemplo, a variação percentual encontrada entre os valores de 80 e 130 para o coeficiente C é de 41,69%. Ou seja, o referido coeficiente, neste caso,

influência no resultado. Para este sistema foram consideradas o funcionamento de três bombas em cada estação elevatória e os valores de C variam de 80 a 130.

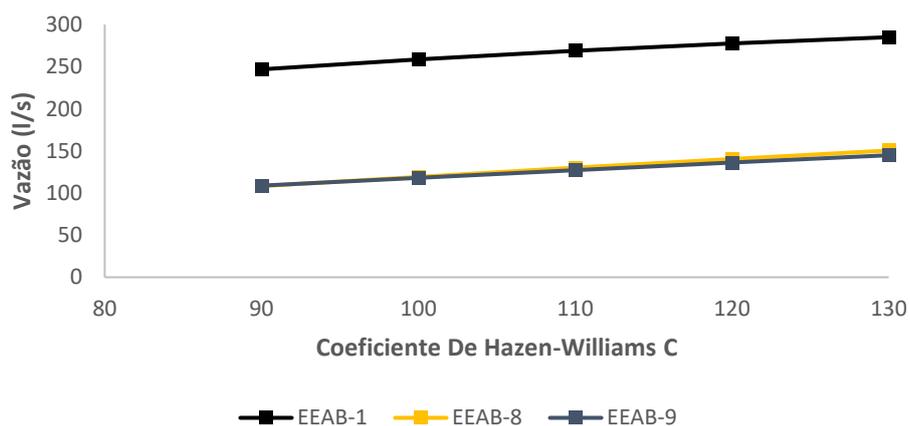
Ademais, no sistema Serro Azul, Gráfico 9, a variação, no geral, é pequena, encontrando a maior variação percentual na EEAB-4 no valor de 29%, e, portanto, não tem influência nos resultados. Vale lembrar que para o sistema Alto Capibaribe não foi feita essa avaliação, porque, no sistema, não foi utilizado a equação de Hazen-Williams.

Gráfico 6 – Variação das vazões bombeadas nas estações elevatórias do Tramo Sul do sistema adutor Jucazinho em função do Coeficiente de Hazen-Williams C.



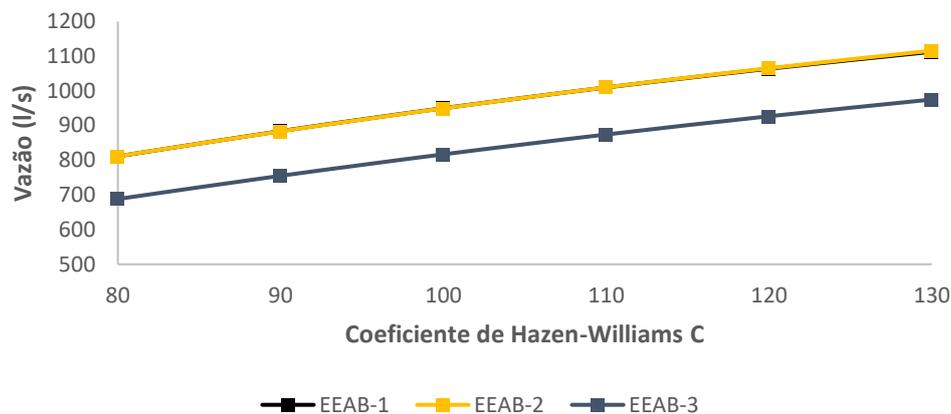
Fonte: O Autor (2022).

Gráfico 7 – Variação das vazões bombeadas nas estações elevatórias do Tramo Norte do sistema adutor Jucazinho em função do Coeficiente de Hazen-Williams C.



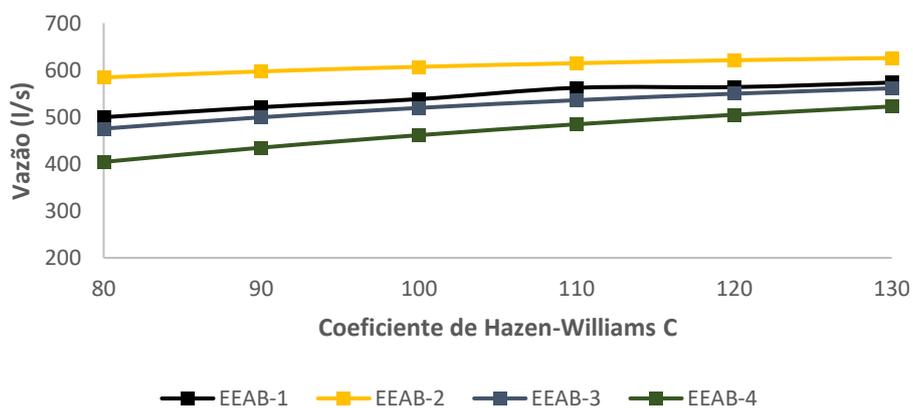
Fonte: O Autor (2022).

Gráfico 8 – Variação das vazões bombeadas nas estações elevatórias do sistema adutor Prata em função do Coeficiente de Hazen-Williams C.



Fonte: O Autor (2022).

Gráfico 9 – Variação das vazões bombeadas nas estações elevatórias do sistema adutor Serro Azul em função do Coeficiente de Hazen-Williams C.

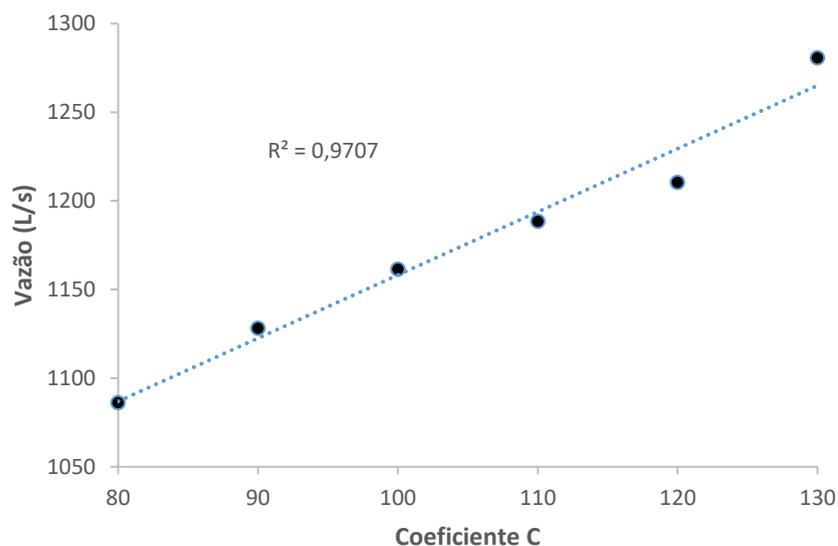


Fonte: O Autor (2022).

No Gráfico 10, é mostrado o gráfico de dispersão representando a correlação existente entre os valores de vazão e coeficiente C para EEAB-1, Tramo Sul, do sistema adutor de Jucazinho. Nota-se que existe uma forte correlação entre as variáveis e o valor de  $R^2$ , coeficiente de determinação, mostra que a variação dos valores de vazão é representada em 97% pela variação dos valores do coeficiente C.

Na Tabela 25, estão representados os valores de correlação e  $R^2$  para as demais estações elevatórias dos sistemas estudados.

Gráfico 10 – Gráfico de dispersão da relação Vazão x Coeficiente C do sistema adutor Jucazinho, Tramo Sul.



Fonte: O Autor (2022).

Tabela 25 – Valores de R e R<sup>2</sup> para relação C x Vazão das estações elevatórias.

Sistema	Estação Elevatória	Correlação (R)	Índice de Determinação (R <sup>2</sup> )
Jucazinho – Tramo Sul	EEAB 1	0,9852	0,9707
	EEAB 2	0,9831	0,9665
	EEAB 3	0,9946	0,9893
	EEAB 4	0,9866	0,9734
	EEAB 5	0,9823	0,9650
Jucazinho – Tramo Norte	EEAB 1	0,9959	0,9919
	EEAB 8	0,9999	0,9997
	EEAB 9	0,9999	0,9998
Prata	EEAB 1	0,9974	0,9948
	EEAB 2	0,9979	0,9958
	EEAB 3	0,9983	0,9965
Serro Azul	EEAB 1	0,9711	0,9430
	EEAB 2	0,9849	0,9700
	EEAB 3	0,9909	0,9819
	EEAB 4	0,9952	0,9904

Fonte: O Autor (2022).

Uma outra importância deste tipo de análise é quanto a eficiência energética do sistema adutor analisado. Conforme Brasil (2005b), existe basicamente duas formas de se otimizar o custo com o uso da energia elétrica no funcionamento dos motores: a primeira, direta, que consiste em utilizar instalações adequadas do ponto de vista da

hidráulica, e a segunda, que não economiza propriamente energia em quantidade, mas em qualidade, consiste em evitar ou se reduzir o consumo energético no horas de ponta. A análise da vazão e do Coeficiente C fazem parte da primeira análise.

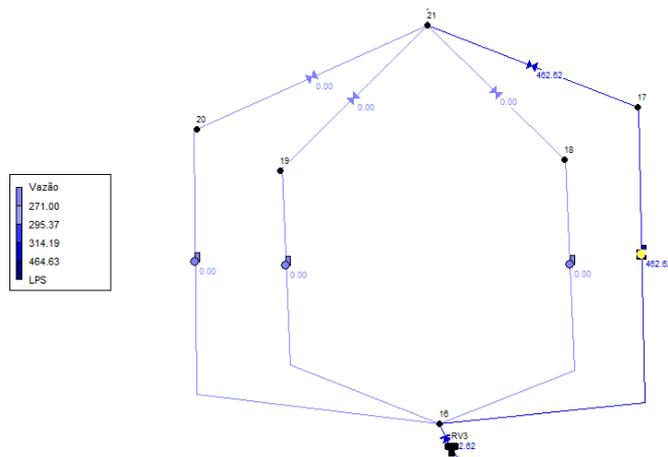
Deste modo, quando se reduz a vazão bombeada, reduz-se diretamente a potência requerida e, conseqüentemente, o consumo de energia. Ademais, manter a tubulação em bom estado de conservação quanto à rugosidade interna (coeficiente “C” alto), também faz com que se tenha um menor custo energético.

Assim, por exemplo, um valor de coeficiente C menor pode ser o equivalente a uma tubulação antiga com incrustações ao longo do caminho o que faz com que mais potência tenha que ser dado ao conjunto motor-bomba para aduzir a água e com isso maior será o consumo energético. Por outro lado, um valor de C maior, representa uma tubulação mais livre, indicando uma vazão de funcionamento maior, podendo reduzir o tempo de funcionamento do conjunto motor-bomba.

A análise energética não é uma tarefa simples, porque deve-se observar vários cenários em conjunto e não apenas isolados. Deve-se analisar desde cenários com menor consumo energético a cenários com menor custo econômico.

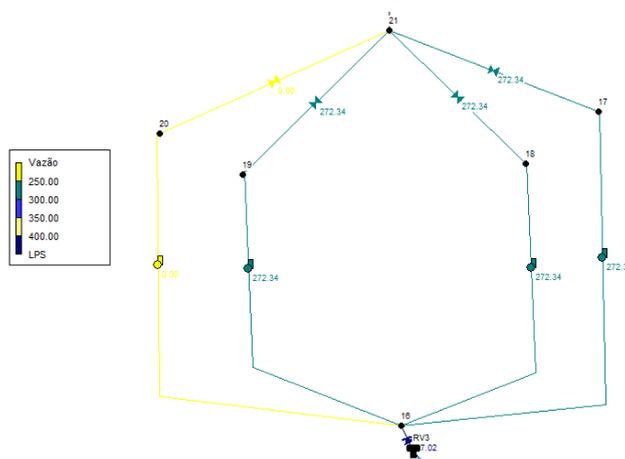
É importante atentar-se para o fato de que quando associadas cada bomba produz uma vazão menor do que produziria se não estivesse associada. Para a estação elevatória 3 (EEAB-3) do sistema adutor Prata, que possui três bombas em funcionamento e uma reserva, uma única bomba sozinha aduziria uma vazão de 462,62 L/s, Figura 19, enquanto que associadas aduzem, cada uma, 272,34 L/s, Figura 20. Como estão três bombas associadas em paralelo a vazão aduzida é de 817,02 L/s e não 1387,86 L/s. O valor bombeado é menor, pois é determinado pela interseção entre a curva do sistema de bombeamento e a curva da tubulação (sistema).

Figura 19 – Vazão da EEAB-3 do sistema adutor Prata, com uma bomba em funcionamento.



Fonte: O Autor (2022).

Figura 20 – Vazão da EEAB-3 do sistema adutor Prata, com três bombas em funcionamento.



Fonte: O Autor (2022).

Do mesmo modo, ao simular o funcionamento de duas bombas, o volume aduzido é de 353,29 L/s para cada bomba, produzindo um total de 707,8 L/s, valor este que é menor que o valor de vazão produzido por duas bombas se fosse verificada isoladamente, que é de 925,24 L/s.

Desta forma, pode-se analisar qual a melhor configuração para o sistema a fim de buscar a economia de energia, melhor rendimento nas diversas situações de rendimento, comparar custos e optar pelo arranjo mais econômico.

Quanto ao consumo energético de sistema adutores, a Tabela 26 mostra as vinte elevatórias com maiores despesas com energia da Companhia Pernambucana de Saneamento, extraída do relatório mensal de demanda, consumo e custo com energia elétrica da companhia com dados referentes a março de 2021. Ao analisar os dados,

percebe-se que juntos, sistema Jucazinho e Prata, são responsáveis por nove das vinte estações elevatórias e juntas são responsáveis por cerca de 38% da energia consumida.

Tabela 26 – As vinte estações elevatórias da COMPESA com maior custo de energia, março 2021.

Unidade	Consumo (kWh)			Valor da fatura mensal (R\$)
	Ponta	Fora de Ponta	Total	
ETA-EEAB Barragem Pirapama	340.615,80	3.390.120,00	3.730.735,80	1.209.678,02
EEAB Prata I	140.323,68	1.365.408,00	<b>1.505.731,68</b>	<b>623.164,52</b>
EEAB Prata II	129.235,68	1.258.416,00	<b>1.387.651,68</b>	<b>551.645,26</b>
EEAB Prata III	125.058,24	1.220.544,00	<b>1.345.602,24</b>	<b>533.409,17</b>
EEAB 01 – Adutora Oeste -Orocó	107.632,80	1.345.500,00	1.453.132,80	477.643,56
EEAB 01 Jucazinho	124.893,00	1.187.640,00	<b>1.312.533,00</b>	<b>463.769,44</b>
EEAB Monjope	88.828,32	864.150,00	952.978,32	386.773,30
EEAB 02 Salgueiro	83.419,92	803.088,00	886.507,92	350.694,21
EEAB 03 – Adutora Oeste – Ouricuri	52.953,12	786.528,00	839.481,12	337.044,22
EEAB/Barragem Catucá (Botafogo 1)	66.025,44	636.192,00	702.217,44	304.546,50
EEAB 03 Jucazinho	78.715,80	742.500,00	<b>821.215,80</b>	<b>288.285,91</b>
EEAB 02 – Adutora Oeste – Jacaré	68.216,40	820.260,00	888.476,40	283.510,58
EEAB 03 Salgueiro – Monte Santo	65.454,48	624.744,00	690.198,48	277.276,19
EEAB Tiúma	54.833,76	532.008,00	586.841,76	254.401,94
EEAB 05 Jucazinho	68.182,20	659.340,00	<b>727.522,20</b>	<b>247.285,34</b>
EEAB 02 Jucazinho	68.025,60	644.040,00	<b>712.065,60</b>	<b>242.909,65</b>
EEAB Ipojuca	50.387,04	487.584,00	537.971,04	235.374,62
EEAB Arataca	46.311,84	453.528,00	499.839,84	198.860,72
Elevatória Vertentes Doce	47.059,49	430.855,20	477.914,69	196.061,52
EEAB 02 Cajueiro-Mundaú	47.689,04	440.776,00	488.465,04	194.627,35

Fonte: O Autor (2022).

Percebe-se que praticamente todas as unidades são estações elevatórias de água bruta (EEAB). Destaque para a EEAB do sistema adutor Pirapama, que tem a maior despesa com energia elétrica, pois é o sistema de maior vazão do estado de Pernambuco. Destaque também para os sistemas Jucazinho e Prata. Jucazinho possui quatro EEAB dentre as vinte com maior despesa com energia elétrica, já o sistema Prata possui todas as suas EEAB dentro do conjunto das vinte elevatórias com maiores despesas com energia.

A Tabela 26 mostra que todas as estações elevatórias do sistema adutor do Prata estão entre as vinte estações com maior consumo de energia. De acordo com a Tabela, com dados referentes ao mês de março de 2021, as estações ocupam a segunda, terceira e quarta posição.

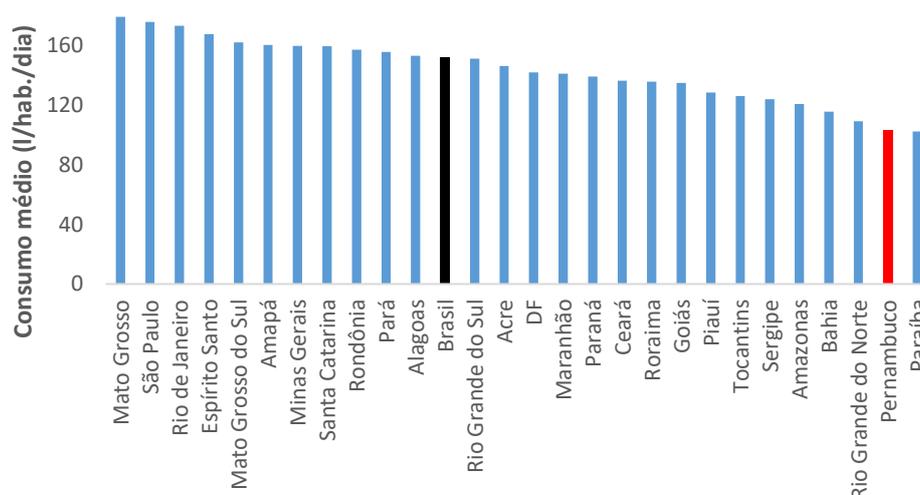
Segundo os dados fornecidos pela COMPESA, o sistema Prata, como um todo, considerando os meses de janeiro de 2019 a março de 2021, tem uma média de consumo de aproximadamente 1.500.797,51 kWh, 1.348.439,63 kWh e de 1.316.619,88 kWh para a EEAB-1, EEAB-2 e EEAB 3, respectivamente.

Ao se analisar, mais uma vez, a Tabela 26, verifica-se que as três estações elevatórias do Prata consomem cerca de 4.238.985,60 kWh e o custo para esse consumo é de R\$ 1.708.218,95 reais por mês e de R\$ 20.498.627,40 reais ao ano. Percebe-se também que a que mais consome energia é a EEAB-1 seguida da EEAB-2 e EEAB-3.

## 9.5 AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE ATENDIMENTO DOS SISTEMAS ADUTORES

O monitoramento do consumo médio de água é um importante instrumento de controle operacional e de planejamento e gestão dos serviços. Este contribui para dimensionar sistemas de abastecimentos em municípios com expansão populacional e para reverter o crescimento de consumo em áreas com disponibilidade hídrica restrita, assim como, projeções de demanda e controle operacional.

De acordo com o SNIS (2020), a média do consumo *per capita* ( $q_{pc}$ ) do Brasil é de 152,1 L/hab/dia. O estado de Mato Grosso é o que possui o maior consumo médio *per capita* (179,5 L/hab/dia). Por sua vez, o estado da Paraíba é o que possui o menor consumo (102,4 L/hab/dia). Pernambuco encontra-se na penúltima posição com 103,5 L/hab/dia, ou seja, é nítido que o estado e, sobretudo o agreste, possui um déficit hídrico. Estes e outros dados são observados na Gráfico 11.

Gráfico 11 – Consumo médio *per capita* dos estados brasileiros.

Fonte: O Autor (2022).

Nota: Adaptado (SNIS, 2021).

Para avaliação, isolada, da capacidade de atendimento dos sistemas adutores, será, primeiramente, necessário verificar qual a demanda da cidade, calcular a população futura, horizonte de projeto de 20 anos, e comparar aos resultados de vazão disponibilizada na modelagem. Na Tabela 27 encontram-se os resultados obtidos em relação ao cálculo da população e no Gráfico 12 mostra-se o resultado em forma de gráfico.

Tabela 27 – Resultado para projeção populacional da cidade de Caruaru.

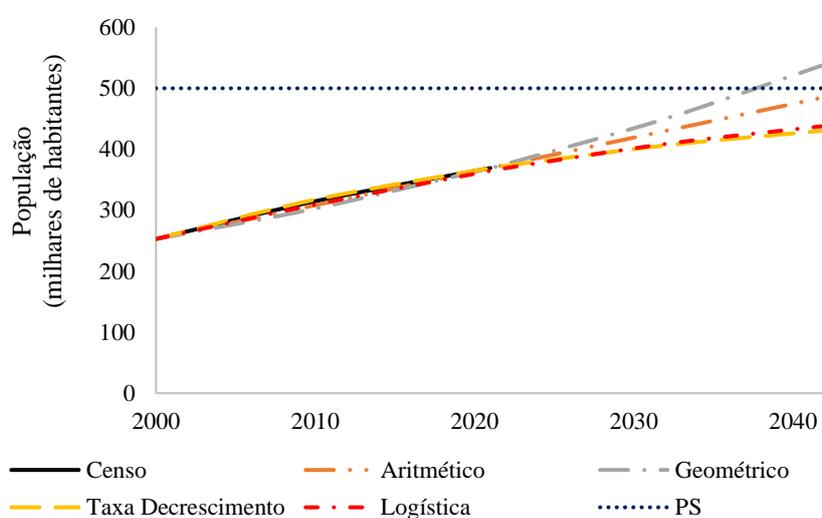
ID	Ano	População (Censo)	População estimada			
			Aritmética	Geométrica	Decrescente	Logística
P0	2000	252.987	252.987	252.987	252.987	252.987
P1	2010	314.912	308.394	302.936	317.598	309.501
P2	2021 <sup>1</sup>	369.343 <sup>1</sup>	369.343	369.343	369.343	364.839
-	2022	-	374.883	376.058	373.247	369.343
-	2032	-	430.291	450.306	406.419	408.851
-	2042	-	485.699	539.214	430.919	438.419
	Média		370.266	381.807	358.419	357.323
	Desvio Padrão ( $\sigma$ )		75.864	93.517	58.710	61.381
	CV (%)		20,49	24,49	16,38	17,18

Fonte: O Autor (2022).

Nota:<sup>1</sup> Valor encontrado e disponível no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/caruaru/panorama>. Acesso: 26/03/2022.

A partir do Gráfico 12, observa-se, por exemplo, que a projeção geométrica conduz a valores estimados bem elevados e que tanto a taxa de decrescimento quanto a curva logística possuem um comportamento semelhante a taxa de crescimento do censo. Contudo, a taxa de decrescimento possui um desvio padrão e um coeficiente de variação menor que a curva logística, mostrando assim que seus valores são mais homogêneos, Tabela 27. Isso mostra que a taxa de decrescimento tem valores mais próximos a média e, portanto, é a que melhor representa a curva obtida a partir dos dados do Censo Demográfico.

Gráfico 12 – Projeção populacional.



Por sua vez, os valores de consumo *per capita* e perda de água na distribuição foram obtidos por meio do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). Os valores fazem parte dos dados preliminares do Diagnóstico dos serviços de Água e Esgoto (2021). Os dados são relativos a indicadores desagregados e agregados e a geração dos dados datam de 08/12/2021. Os valores podem ser visualizados na Tabela 28, assim como o valor do consumo *per capita* efetivo conforme Equação (7).

Tabela 28 – Indicadores operacionais de água e seus respectivos valores – Caruaru-PE.

Indicadores Operacionais – Água	Valores
Consumo médio <i>per capita</i> (L/hab/dia)	100,67
Índice de perdas na distribuição (%)	36,88
Consumo efetivo <i>per capita</i> (L/hab/dia)	159,49

Fonte: O Autor (2022).

Segundo o mesmo relatório, conforme a COMPESA, o índice de atendimento total de água e o de atendimento urbano de água é de 100%.

Nota-se que a população do ano de 2032 cresce, aproximadamente, 8,88% em relação ao ano de 2022 e que a população de 2042 cresce cerca de 6% em relação ao ano de 2032. Os mesmos percentuais são usados para o aumento da vazão *per capita* média efetiva considerando o mesmo índice de perdas. Esses valores serão comparados com os valores obtidos na modelagem para saber se os sistemas, atualmente, são capazes de atender, sozinhos, a demanda solicitada pela população. Os resultados são mostrados nas Tabelas 29 e 30.

Tabela 29 – Vazões *per capita*s efetivas e vazões de demanda.

Ano	População (hab)	Q <sub>e</sub> (L/hab/dia)	Q <sub>demanda</sub> (L/s)
2022	373.247	159,49	689
2032	406.419	173,65	816,8
2042	430.919	184,07	918

Fonte: O Autor (2022).

Tabela 30 – Déficits das demandas dos sistemas adutores.

Sistema Adutor	Q <sub>modelada</sub> (L/s)	Ano			Ano		
		2022	2032	2042	2022	2032	2042
		Q <sub>estimada</sub> (L/s)			Déficit (L/s)		
Prata	817	689	816,8	918	-	-	101
Jucazinho	397	689	816,8	918	292	419,8	521
Prata + Pirangi	1.137	689	816,8	918	-	-	-
Prata + Jucazinho	1.065	689	816,8	918	-	-	-

Fonte: O Autor (2022).

Vale a pena mencionar que os valores podem estar subdimensionados devido à intermitência do abastecimento de água. Isso pode explicar o baixo valor do consumo *per capita*.

A partir da Tabela 30, nota-se que o sistema adutor do Prata consegue atender a demanda da cidade de Caruaru, mas para anos futuros já se encontra certa dificuldade até chegar em uma condição de déficit. Já o sistema adutor de Jucazinho não consegue atender a demanda da cidade visto que as vazões disponibilizadas são inferiores à demanda da cidade apresentando assim os déficits. Nesse sentido, pode-se explicar a

racionalização de água, conhecida como rodízio. Atualmente, em Caruaru, são cinco dias com água e dez sem água a depender do bairro e da época, que pode aumentar ou diminuir esses intervalos sem abastecimento de água.

O sistema Prata poderia ter sua vazão aumentada com o auxílio do sistema Pirangi, que surgiu como uma solução ao colapso da barragem de Jucazinho. Como o sistema Prata não possui capacidade hídrica para um aumento de retirada de vazão, verificou-se que esse reforço poderia vir a partir da captação do Rio Pirangi possibilitando um incremento de 320 L/s para a cidade de Caruaru-PE. Desta forma, com o incremento indo para a cidade de Caruaru, não haveria déficit.

O sistema Pirangi, que possui cerca de 27 km e duas estações elevatórias, não é considerado um sistema adutor a mais, porque só funciona quando há demanda e, quando preciso, abastece o sistema de captação do Rio Prata levando água até a o poço de sucção (EEAB-1) do sistema Prata. Atualmente, não está em funcionamento.

Ademais, nota-se que poderiam ser utilizados os sistemas adutores do Prata e de Jucazinho para o abastecimento de Caruaru, ou seja, a utilização simultânea dos dois sistemas seria uma alternativa para o abastecimento da cidade. O somatório das vazões dos sistemas faz com que não haja déficit, conseguindo atender a demanda da população.

De acordo com o guia profissional de sistemas e processos de tratamento de águas de abastecimento (BRASIL, 2007, p. 12), muitas residências poderiam reduzir o consumo de água entre 10 e 25%, sem mudança significativa da qualidade de vida. Nesse sentido, o consumo de água diminuiria e os sistemas adutores poderiam atender a demanda da cidade por mais tempo. No entanto, sabe-se que essa redução, em algumas regiões do país, sobretudo no agreste e sertão pernambucano, é difícil devido ao fato das regiões sofrerem com frequentes secas e estiagens.

Porém é fácil perceber que, algumas medidas podem ser tomadas a fim de aumentar o número de pessoas atendidas e minimizar ou equacionar a situação de déficit hídrico existente, como por exemplo, sensibilização no uso da água, reutilização de água e a redução das perdas físicas de água na distribuição.

Por exemplo, ao reduzir-se o índice de perdas de 36,88% para 25%, que seria um índice de perdas aceitável conforme Tsutiya (2006) e mantendo a vazão de demanda constante, o valor do consumo *per capita* efetivo passa a ser de 134,23 L/s, uma redução de aproximadamente 16%. Desta forma, a população a ser atendida seria de 443.497 habitantes, ou seja, ao reduzir o índice de perdas, a população atendida teria um acréscimo de 70.250 habitantes.

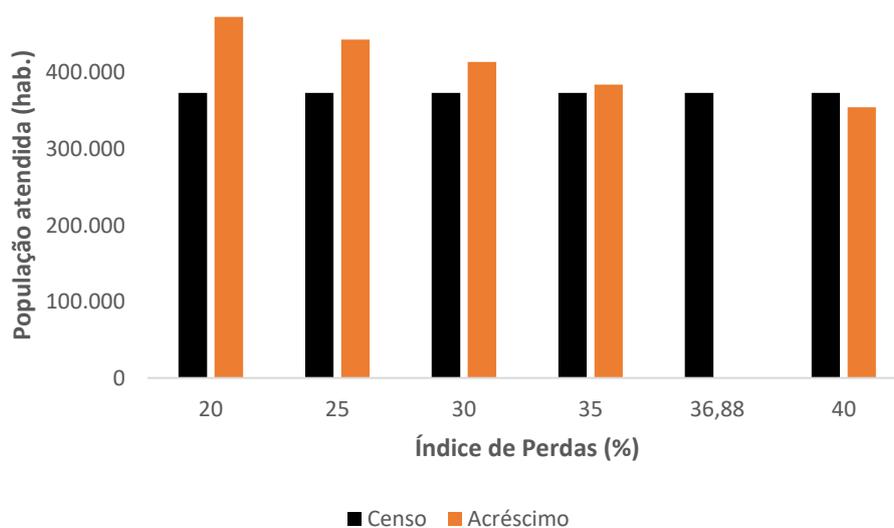
A Tabela 31 mostra a relação entre a diminuição do índice de perdas, a população atendida e o acréscimo de população. Por sua vez, o Gráfico 13 mostra a mesma análise de uma forma gráfica.

Tabela 31 – Relação entre o índice de perdas e a população atendida.

<b>Índice de perdas (%)</b>	<b>População atendida (hab.)</b>	<b>Acréscimo de população (hab.)</b>
40	354.798	-18.449
36,88	373.247	-
35	384.364	11.117
30	413.931	40.684
25	443.497	70.250
20	473.064	99.817

Fonte: O Autor (2022).

Gráfico 13 – Análise gráfica da relação entre o índice de perdas de água e a população atendida.



Fonte: O Autor (2022).

Uma outra forma de melhorar o atendimento, sem interrupções, seria a alocação eficiente da água por múltiplas fontes de abastecimento a partir da construção de um Sistema de Suporte a Decisão (SSD) que faça com que a cidade seja abastecida por uma quantidade ótima de água retirada de mais de um sistema.

Existem interligações entre os sistemas Jucazinho, Prata e Pirangi que possibilitam a transferência de água para Caruaru. Ao término da construção da adutora de Serro Azul e adutora do Agreste, será possível o abastecimento da cidade utilizando

qualquer um dos sistemas ou um conjunto de sistemas de acordo com os custos de bombeamento e disponibilidade hídrica.

Neste sentido, Ramos (2017) desenvolveu um modelo, utilizando o método do monitor de secas, que busca possibilitar a decisão de gestores públicos por meio de uma operação racional de reservatórios e transferências entre bacias para abastecimento de cidades do agreste pernambucano. Foram simulados cenários para o abastecimento pleno das cidades e foi possível quantificar os déficits existentes para cada cidade do agreste. Foi identificada as necessidades de vazões em litros por segundo de importação de água, de outras regiões do agreste para o abastecimento das cidades. Com os resultados obtidos concluiu-se que, para suprir os déficits existentes, seria necessária que a segunda etapa da transposição do rio São Francisco fosse concluída para que se possa ter um atendimento pleno a população das cidades.

Souza (2021) propôs um SSD que analisa critérios hídricos, técnicos e econômicos, baseado em balanço hídrico, para alocação ótima de recursos hídricos para cidades do agreste pernambucano utilizando os sistemas do Prata, Jucazinho, Pirangi, Serro Azul e Adutora do Agreste. Utilizando a linguagem de programação Python, o método baseou-se na definição da vazão máxima que pode ser retirada de cada reservatório em função do seu nível de acúmulo. Desta forma, a depender do volume dos reservatórios Jucazinho e Prata, o SSD utilizaria os recursos provenientes de outros sistemas. De acordo com a autora, para o ano base de 2014 e o ano de projeção de 2037, a principal fonte de abastecimento da cidade é o reservatório de Jucazinho devido a maior disponibilidade hídrica. Contudo, o abastecimento da cidade também seria contemplado por água vinda do sistema Prata, Pirangi, que se mostrou uma fonte confiável, e, quando preciso, pelos sistemas Serro Azul e Adutora do Agreste que seriam mais utilizadas quando o reservatório de Jucazinho estivesse com o volume reduzido.

## 10 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo a modelagem hidráulica de quatro sistemas adutores de abastecimento de água localizados no agreste pernambucano. Para a modelagem foi utilizado o *software* de simulação hidráulica EPANET 2.0. Sabe-se que a modelagem hidráulica é indispensável para o controle eficiente de sistemas de abastecimentos e são eficientes ferramentas de apoio à decisão.

Portanto, é notória a necessidade de investimentos, por parte das empresas, no desenvolvimento de ferramentas e estratégias para uma gestão eficiente dos sistemas de abastecimento de água. Uma modelagem correta propicia melhorias na qualidade geral da informação disponível sobre os sistemas no conhecimento da infraestrutura e na articulação dos diversos setores técnicos das empresas. Desta forma, a modelagem hidráulica é uma ferramenta imprescindível para o alcance de uma gestão correta, segura e eficiente.

A finalidade da modelagem é fazer com que os modelos hidráulicos sejam uma representação fidedigna dos modelos reais. Neste sentido, as simulações feitas e os resultados obtidos mostram que o modelo produzido no *software* corresponde, em grau satisfatório, à realidade encontrada nos sistemas reais. Desta forma, o estudo apresentado pode ser utilizado por técnicos da COMPESA para análises e planejamentos futuros dos sistemas adutores analisados gerando otimização, eficiência e eficácia nos testes e simulações a serem realizados. Deste modo, a qualidade das informações geradas proporcionará aos gestores uma melhor análise das operações presentes e futuras dos sistemas estudados.

Para o alcance dos resultados, foram importantes as visitas *in loco*, pois os dados de entrada do modelo são fundamentais para o sucesso da modelagem, e as análises pitométricas em dois dos quatro sistemas estudados. Os sistemas adutores visitados foram Jucazinho e Prata, pois já estão em funcionamento. Os outros dois, Serro Azul e Alto Capibaribe, ainda se encontram em fase de construção ou projeto.

As análises feitas, apesar da dificuldade na obtenção dos dados e análises pitométricas, foram suficientes para demonstrar que o modelo obtido pode caracterizar o sistema real. Neste sentido, foram feitas várias simulações a fim de conseguir fazer com que o modelo mostrasse resultados os mais próximos possíveis dos sistemas em operação. Para afirmar a validação do modelo, foram feitas análises estatísticas por meio da

correlação entre as variáveis, que atestaram uma forte correlação entre as variáveis medidas e observadas.

Além disso, pela análise de sensibilidade foi possível mostrar que os parâmetros vazão e coeficiente C estão fortemente relacionados, o que pode ser atestado pelos seus valores de correlação. Além disso, o coeficiente C é um fator importante para calibração, porém o seu aumento não influencia muito em alguns sistemas, o que pode ser justificado pelo grande desnível geométrico existente nos sistemas.

No estudo ainda foi feita uma análise da capacidade de atendimento dos sistemas adutores para abastecimento da cidade de Caruaru-PE. Neste sentido, com dados obtidos, consumo *per capita* e índice de perdas na distribuição, pela COMPESA, além do cálculo populacional, mostra-se que para um horizonte de futuro de 20 anos, o uso conjunto dos sistemas Prata e Jucazinho é capaz de atender ao aumento da população. Mostra-se também que o índice de perdas está diretamente relacionado a quantidade de pessoas atendidas, de modo que, ao reduzir-se esse índice a população atendida seria maior.

Os resultados poderiam ser muito melhores caso as condições de análise pitométrica fossem melhores, visto que houve alguns imprevistos na referida análise, que melhoraria a construção das curvas das bombas. Deste modo, para trabalhos e pesquisas futuras, com a finalidade de melhorar a pesquisa atual, sugere-se melhores condições nas análises pitométricas e um melhor estudos dos conjuntos motor-bomba para análises de eficiência energética, pois dois dos quatro sistemas estudados, Jucazinho e Prata, possuem conjuntos motor bomba com alto consumo energético.

Por fim, vale destacar que, com o crescimento da população e por consequência o aumento do volume de água a ser disponibilizado, os sistemas de abastecimento de água estão ficando cada vez maiores e mais complexos. A utilização de *software* de modelagem hidráulica proporciona uma correta exploração dos sistemas e a garantia das satisfações hidráulicas necessárias e um correto e confiável planejamento futuro dos sistemas. Deste modo, o uso e o desenvolvimento de ferramentas de simulação hidráulica tornam-se cada vez mais cruciais e importantes para uma correta análise da operação desses sistemas para que possa fornecer um serviço confiável e de qualidade.

Portanto, é imprescindível uma correta análise dos dados de entrada e das simulações a serem feitas. Deste modo, o modelo computacional caracterizará fielmente o modelo real conseguindo assim inúmeros benefícios para as companhias e para a população a ser atendida.

## REFERÊNCIAS

- 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, DOI: 10.2166/washdev.2018.262.
- ANISHA, G.; KUMAR, A.; KUMAR, J. A.; RAJU, P. S. Analysis and design of water distribution network using EPANET for Chirala municipality in Prakasan District of Andhra Pradesh. **International Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 3, n. 4, p. 2394-3661, 2016.
- ARMENDARIZ, I. A. **Modelado hidráulico y calibrado de la red de abastecimento de agua potable de la Comarca de Pamplona**. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente – Universitat Politècnica de València. p. 107. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12218: **Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público** – Procedimento. 2ª ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- BERREZAL, Y. A.; ABDELBAKI, C.; BENABDELKRIM, M. E. A. Coupling of GIS and Hydraulic Modeling in Management of an Urban Water Distribution Network—A Case Study of Tlemcen (Algeria). In: *Sustainable Energy-Water-Environment Nexus in Deserts*. Springer, Cham, v. p. 253-258, 2022, DOI: 10.1007/978-3-030-76081-6-30.
- BIRSI, M.; SISINGGIH, D.; PUTRA, W. D. **Development of clean water distribution network capacity by using WaterCad**. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. v. 9, n. 11, p. 466-473. 2018.
- BISCOS, C.; MULHOLLAND, M.; LE LANN, M.; V.; BUCKLEY, C. A.; BROUCKAERT, C. J. Optimal operation of water distribution networks by predictive control using MINLP. **Water SA**, v. 29, n. 4, p. 393-404, 2003, DOI: 10.4314/wsa.v29i4.5044.
- BOSCO, C.; CAMPISANO, A.; MODICA, C.; PEZZINGA, G. Application of rehabilitation and active pressure control strategies for leakage reduction in a case-study network. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 8, 2020, DOI: 10.3390/w12082215.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2019: informe anual**. Brasília: ANA, 2019.
- BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria de Saneamento Ambiental. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: **Diagnóstico dos serviços de água e esgoto** – 2021.
- BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. (2007) **Abastecimento de água: sistemas e processos de tratamento de águas de abastecimento**. Guia do profissional em treinamento: nível 2. Porto Alegre, 2007. p. 148.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea – Diagnóstico do município de Caruaru – Pernambuco**. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005<sup>a</sup>.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Eficiência energética em sistemas de bombeamento. Rio de Janeiro: Eletrobrás. p 272. 2005<sup>b</sup>.

BRENTAN, B. M. **PSO com refinamento para definição de manobras visando à redução do custo energético no bombeamento de água**. Dissertação de Mestrado, Unicamp, Campinas, Brasil, 2014.

BRENTAN, B.; MEIRELLES, G.; LUVIZOTTO, E.; IZQUIERDO, J. Joint operation of pressure-reducing valves and pumps for improving the efficiency of water distribution systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 144, n. 9, 2018, DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000974.

CHATZIVASILIS, S., PAPADIMITRIOU, K., KANAKOUDIS, V. Optimizing the formation of DMAs in a water distribution network through advanced modelling. **Water**, v. 11, n. 2, p. 278, 2019, DOI: 10.3390/w11020278.

CHONDRONASIOS, A.; GONELAS, K.; KANAKOUDIS, V.; PATELIS, M.; KORKANA, P. Optimizing DMA's formation in a water pipe network: The water aging the operation pressure factors. **Journal of Hydroinformatics**, v. 19, n. 6, p. 890-899, 2017, DOI: 10.2166/hydro.2017.156.

CIRILO, J. A. **Crise hídrica: desafios e superação**. **Revista USP**, n. 106, p. 45-58, 2015.

CIRILO, J. A. **Políticas públicas de recursos hídricos para o semiárido**. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 61-82, 2008.

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.

COMPANHIA PERNAMBUCANA DE SANEAMENTO – COMPESA. **Nota técnica: sistema de abastecimento integrado Jucazinho**. Recife – PE. 2020.

DARWEESH, M. S.; Assessment of variable speed pumps in water distribution systems considering water leakage and transient operations. **Journal of Water Supply: Research and Technology**, v. 67, n. 1, p. 99-108, 2017, DOI: 10.2166/aqua.2017.086.

DINI, M.; ASADI, A. Optimal operation scheduling of available partially closed valves for pressure management in water distribution networks. **Water Resources Management**, v. 34, p. 2571-2583. 2020, DOI: 10.1007/s11269-020-02579-4.

FUNDAÇÃO DE APOIO AO DESENVOLVIMENTO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO. **Análise e modelagem dos sistemas adutores considerando a integração das fontes hídricas: Elaboração da modelagem operacional dos sistemas produtores integrados do agreste pernambucano.** Recife-PE. 2022.

GIUSTOLISI, O. Enhanced WDN hydraulic modelling and detection of burst leakages. **Procedia Engineering**, v. 162, p. 3-14, 2016.

GOMES, H. P. **Abastecimento de água.** João Pessoa, PB, Brasil, LENH/UFPB, 2019.

GOMES, H. P. **Sistemas de abastecimento de água: Dimensionamento econômico e operação de redes e elevatórias.** 3º ed. João Pessoa: Editora Universitária UFPB, 2009.

GOMES, H. P.; CAMBOIM, W. L. L.; SILVA, S. A. (2014) **Aplicação de Técnicas Fuzzy no Controle de Pressão em Sistemas de Abastecimento de Água.** ABES. p. 67-77.

GONELAS, K.; CHONDRONASIOS, A.; KANAKOUDIS, V.; PATELIS, M.; KORKANA, P. Forming DMAs in a water distribution network considering the operating pressure and the chlorine residual concentration as the design parameters. **Journal of Hydroinformatics**, v. 19, n. 6, p. 900-910, 2017, DOI: 10.2166/hydro.2017.157.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. BRASIL/PERNAMBUCO/CARUARU. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/caruaru/panorama>. Acesso em: 10/02/2021.

JAFARI-ASL, J.; KASHKOOLLI, B. S.; BAHRAMI, M. Using particle swarm optimization algorithm to optimally locating and controlling of pressure reducing valves for leakage minimization in water distribution systems. **Sustainable Water Resources Management**, v. 6, n. 64, 2020, DOI: 10.1007/s40899-020-00426-3.

JAFARI-ASL, J.; KASHKOOLLI, B.; BAHRAMI, M. Optimal pressure control for leakage minimization in water distribution networks. **Journal of Water and Sustainable Development**, v. 4, n. 2, p. 49-56, 2018.

KARA, S.; KARADIREK, E.; MUHAMMETOGLU, A.; MUHAMMETOGLU, H. Hydraulic model of a water distribution network in a tourism area with highly varying characteristics. **Procedia Engineering**. v. 162, p. 521-529, 2016, DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.096.

LIMA, R. C. **Modelação de um sistema adutor.** Dissertação (mestrado), Mestrado Integrado em engenharia civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal. 101 p. 2008.

LOUSADA, S.; CASTANHO, R. A.; SILVA, P. S.; GÓMEZ-NARANJO, J. M. **Modelação de sistemas de abastecimento de água.** O caso da ilha da Madeira.

Bitácora Urbano Territorial, v. 29, n. 2, p. 89-98, 2019, DOI: 10.15446/bitacora.v29n2.69381.

LUNA, T.; RIBAU, J.; FIGUEIREDO, D.; ALVES, R. Improving energy efficiency in water supply systems with pump scheduling optimization. **Journal of Cleaner Production**, v. 213, p. 342-356. 2019, DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.12.190.

MABROK, M. A.; SAAD, A.; AHMED, T.; ALSAYAB, H. Modeling and simulations of Water Network Distribution to Assess Water Quality: Kuwait as a case study. **Alexandria Engineering Journal**, v. 61, n. 12, p. 11859-11877, 2022.

MAMBRETTI, S. ORSI, E. Optimizing pump operations in water supply networks through genetic algorithms. American Water Works Association. **Journal AWWA**, v. 108, n. 2, p. 119-125. 2016, DOI: 10.5942/jawwa.2016.108.0025.

MARTINHO, N.; ALMEIDA, J. P.; SIMÕES, N. E.; SÁ-MARQUES, A. Urban Water: Integrating EPANET 2 in a PostgreSQL/PostGIS-Based geospatial database management system. **International Journal of Geo-Information**, v. 9, n. 9, 2020, DOI: 10.3390/ijgi9110613.

MEKONNEN, Y. A. Evaluation of Hydraulic Performances Modeling of Water Distribution Systems and Physicochemical Water Quality Analysis, in the Case of Dangila Town, Amhara Region, Ethiopia. *Water Conservation Science and Engineering*, p. 1-19, 2022, DOI: 10.1007/s41101-022-00140-5.

NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL – ONU BR. **17 Objetivos para transformar o mundo**. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030>. Acesso em: 26/05/2020.

ORMSBEE, L. E. **The history of water distribution networks analysis: The computer age**. In Proceedings of the 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium, Cincinnati, Ohio, USA, 27-30 August 2006. [Google Scholar].

OSTFELD, A. SALOMONS, E. ORMSBEE, L. UBER, J. G. The battle of the water calibration networks (BWCN). **Journal of Water Resources Planning and Management**. v. 138, n. 5, 2012.

PATELIS, M.; KANAKOUDIS, V.; KRAVVARI, A. Pressure regulation vs. Water aging in water distribution networks. **Water**, v. 12, n. 5, 2020, DOI: 10.3390/w12051323.

RAJAKUMAR, A. G.; CORNELIO, A. A.; KUMAR, M. S. M. Leak management in district metered areas with internal-pressure reducing valves. **Urban Journal Water**, v. 17, n. 8, p. 714-722, 2020, DOI: 10.1080/1573062X.2020.1773508.

RAMANA, G. V.; CHEKKA, V. S. S. S. Validation and examination of existing water distribution network for continuous supply of water using EPANET. **Water Resources Management**, v. 32, p. 1993-2011, 2018, DOI: 10.1007/s11269-017-1889-x.

RAMOS, N. M. R. **Modelagem na gestão de sistemas hídricos integrados do semiárido brasileiro: estudo de caso do agreste pernambucano**. Tese (Doutorado),

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, Pernambuco. 145p. 2017.

REGO, A. A. C. **Integração de ferramentas SIG para otimização de um sistema adutor com recursos ao Epanet. 2007.** Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Porto, Portugal. 135p. 2007.

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. 201, 2009.

SAMIR, N.; KANSOH, R.; ELBARKI, W.; FLEIFLE, A. Pressure control for minimizing leakage in water distribution systems. **Alexandria Engineering Journal**, v. 56, n. 4, p. 601-612, 2017, DOI: 10.1016/j.aej.2017.07.008.

SANTOS, L. P. S.; COUTINHO, R. S.; SOARES, A. K. Multiobjective optimization of the operation of water distribution systems with variable speed pumps. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 5, p. 701-714. 2020.

SILVA, C. O. **Modelagem de rede de distribuição de água com ênfase no controle de perdas.** Dissertação (mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba – UFPB, João Pessoa. 113p. 2014.

SILVA, J. H. F. **Exploração das potencialidades do programa Epanet na simulação hidráulica de sistemas de abastecimento de água.** 2008. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto. Porto, Portugal. 76 p. 2008.

SILVA, P. A. S. **Modelação e calibração de um sistema de abastecimento de água (sistema adutor de Câmara de Lobos).** Dissertação (mestrado) – Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia, Universidade da Madeira. Funchal, Portugal. 207 p. 2016.

SOPHOCLEOUS, S.; SAVIC, D.; KAPELAN, Z. Leak localization in a real water distribution network based on search-space reduction. **Journal of Water Resources Planning and Management** v. 145, n. 7, 2019, DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001079.

SOUZA, J. D. S. **Sistema de suporte à decisão espacial para a gestão integrada de múltiplos sistemas adutores.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. 90p. 2021.

SPERLICH, A.; PFEIFFER, D.; BURGSCHWEIGER, J.; CAMPBELL, E.; BECK, M.; GNIRSS, R.; ERNST, M. Energy efficient operation of variable speed submersible pumps: simulation of a ground water well field. **Water**, v. 10, n. 9, 2018, DOI: 10.3390/w10091255.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de água**. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 3<sup>o</sup> edição. São Paulo, 2006.

ZHANG, K.; YAN, H.; ZENG, H.; XIN, K.; TAO, T. A practical multi-objective optimization sectorization method for water distribution network. **Science of the Total Environment**, v. 656, p. 1401-1412, 2018, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.273.