

RAQUEL XAVIER SILVA

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E MODELO DE CALIBRAÇÃO EM
SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. Juan Moíses Mauricio Villanueva
Coorientador: Dr. Heber Pimentel Gomes

JOÃO PESSOA - PB

2025

RAQUEL XAVIER SILVA

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E MODELO DE CALIBRAÇÃO EM
SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr Juan Moises Mauricio Villanueva
Coorientador: Dr. Heber Pimentel Gomes

JOÃO PESSOA - PB

2025

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586a Silva, Raquel Xavier.

Análise da eficiência energética e modelo de
calibração em sistemas de abastecimento de água /
Raquel Xavier Silva. - João Pessoa, 2025.
104 f. : il.

Orientação: Juan Moíses Mauricio Villanueva.

Coorientação: Heber Pimentel Gomes.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Abastecimento de água - sistemas. 2. Operação de
bombas. 3. Modelagem hidráulica. 4. Eficiência
energética. 5. Algoritmos evolutivos. I. Villanueva,
Juan Moíses Maurício. II. Gomes, Heber Pimentel. III.
Título.

UFPB/BC

CDU 628.1(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGE

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E MODELO DE CALIBRAÇÃO EM
SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

Elaborado por

RAQUEL XAVIER SILVA

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

COMISSÃO EXAMINADORA

JUAN MOISES MAURICIO VILLANUEVA (ORIENTADOR)

HEBER PIMENTEL GOMES (COORIENTADOR)

YURI PERCY MOLINA RODRIGUEZ (AVALIADOR INTERNO)

EDUARDO PACIENCIA GODOY (AVALIADOR EXTERNO)

João Pessoa/PB, 27 de fevereiro de 2025.



ATA DE DEFESA PÚBLICA DE TRABALHO FINAL DE MESTRADO

Aos 27 dias do mês de fevereiro de 2025, no horário de 14h30min às 16h30min, foi realizada, por videoconferência, a defesa pública de Trabalho Final de Mestrado do PPGEE/UFPB, da mestranda RAQUEL XAVIER SILVA, que se intitula: *Análise da eficiência energética e modelo de calibração em sistemas de abastecimento de água*.

A Banca Examinadora, constituída pelo Professor Orientador, Juan Moises Mauricio Villanueva (Presidente - PPGEE/UFPB), e pelos professores Heber Pimentel Gomes (Coorientador - PPGEM/UFPB), Yuri Percy Molina Rodriguez (Examinador Interno - PPGEE/UFPB) e Eduardo Paciência Godoy (Examinador Externo/UNESP), emitiu o seguinte parecer:

A defesa do trabalho de mestrado foi aprovada e a mestranda deverá elaborar o documento final seguindo as recomendações e sugestões da banca avaliadora, para realizar a entrega na coordenação por um período de 30 dias.

_____.

Resultado final – Conceito:

(☒) Aprovado.

(☐) Insuficiente

(☐) Reprovado.

Eu, Juan Moises Mauricio Villanueva, Orientador do Trabalho, lavrei a presente Ata que segue por mim assinada e pelos demais membros da Banca Examinadora.



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Documento assinado digitalmente
JUAN MOISES MAURICIO VILLANUEVA
Data: 05/03/2025 23:08:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Juan Moises Mauricio Villanueva

Prof. Dr. Heber Pimentel Gomes



Documento assinado digitalmente
YURI PERCY MOLINA RODRIGUEZ
Data: 06/03/2025 16:05:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Yuri Percy Molina Rodriguez



Documento assinado digitalmente
EDUARDO PACIENCIA GODOY
Data: 06/03/2025 18:18:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Eduardo Paciência Godoy

A minha irmã, Rute Xavier Silva, por estar ao meu lado nos caminhos da vida, aos meus pais, Jacira Maria Xavier e Givanildo da Silva, por me ensinarem a seguir com coragem; e às pessoas singulares que transmitem clareza e serenidade, estejam elas presentes neste plano ou não...

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por Sua presença constante em todos os momentos da minha caminhada, concedendo-me força e serenidade para enfrentar os desafios e seguir adiante.

Aos meus pais, Jacira Maria Xavier e Givanildo da Silva, por cada ensinamento, percebido ou não, e por estarem sempre presentes, mesmo à distância e além das fronteiras. Seu apoio incondicional foi essencial nesta trajetória.

À minha irmã, Rute Xavier Silva, por ser amiga, companheira e uma fonte inesgotável de inspiração nos meus dias.

Ao Prof. Dr. Juan Villanueva, pela dedicação e empenho ao longo do processo de aprendizado, pelos valiosos conselhos e pelo incentivo constante durante a pós-graduação. Ao Prof. Dr. Heber Gomes, pelo auxílio fundamental no desenvolvimento deste trabalho, pela partilha de conhecimento e pela disponibilidade sempre presente.

Aos meus colegas de pós-graduação, pela troca de experiências e pelos momentos enriquecedores vividos em cada etapa dessa jornada. Aos professores que, direta ou indiretamente, contribuíram para a construção desse caminho, minha sincera gratidão.

Agradeço às políticas públicas que possibilitaram minha trajetória no ensino superior, especialmente à política de interiorização do ensino nos Institutos Federais de Educação, Ciência e Tecnologia (IFs), às iniciativas de permanência estudantil e à política de cotas, que promovem equidade em um país marcado por desigualdades estruturais.

Por fim, sou imensamente grata às pessoas singulares que caminham ao nosso lado, enriquecendo nossas escolhas e contribuindo de maneira inestimável para os desafios e aprendizados do dia a dia.

"Quem tem consciência para ter coragem, quem tem a força de saber que existe, e no centro da própria engrenagem, inventa a contra mola que resiste."
João Ricardo Carneiro Teixeira Pinto.

PREFÁCIO

A presente dissertação é resultado da bolsa MAI (Mestrado Acadêmico de Inovação), da Chamada CNPq Nº 12/2020 - Programa de Mestrado e Doutorado Acadêmico para Inovação - MAI/DAI e concedida por meio do Edital nº 01/2022 do Mestrado e Doutorado Acadêmico em Inovação – MAI/DAI/UFPB. O estudo foi financiado pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), em parceria com a fábrica de vidros planos VIVIX, localizada no município de Goiana – PE.

A pesquisa foi desenvolvida em colaboração com o setor de Transformação Digital da fábrica, com duração de março de 2023 a fevereiro de 2025, resultando na entrega de ferramentas de suporte a gestão operacional para o Sistema de Abastecimento de Água (SAA) da fábrica, além da dissertação ao PPGEE (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) da UFPB – Campus I.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	VIII
RESUMO.....	XII
ABSTRACT.....	XIII
1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 OBJETIVO GERAL.....	17
1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.2 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	18
1.3 ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	18
2 REVISÃO DE LITERATURA	21
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	27
3.1 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA.....	27
3.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	28
3.3 MODELAGEM HIDRÁULICA	30
3.4 INVERSOR DE FREQUÊNCIA	32
3.5 CALIBRAÇÃO DE MODELOS HIDRÁULICOS	34
3.6 ALGORITMOS EVOLUTIVOS.....	37
3.6.1 ESTRATÉGIAS EVOLUTIVAS.....	39
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
4.1 TIPOS DE ESTUDO.....	41
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DO LOCAL DE ESTUDO	41
4.2.1 SISTEMA DE BOMBEAMENTO DA ÁGUA DOS POÇOS.....	42
4.2.2 SISTEMA DE BOMBEAMENTO DA ÁGUA DO FORNO	44
4.3 ANÁLISE DOS DADOS.....	45
4.4 MODELAGEM HIDRÁULICA	48
4.5 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	49
4.5.1 MODALIDADE TARIFÁRIA	49
4.5.2 INVERSOR DE FREQUÊNCIA	51
4.5.3 ANÁLISE ECONÔMICA	52
4.6 MODELAGEM E CALIBRAÇÃO DO SETOR ÁGUA DISTRIBUIÇÃO DO FORNO	54
4.6.1 MODELAGEM DO SETOR ÁGUA DISTRIBUIÇÃO DO FORNO.....	54
4.6.2 CALIBRAÇÃO DO SETOR ÁGUA DISTRIBUIÇÃO DO FORNO.....	56

5 RESULTADOS	62
5.1 RESULTADOS DOS PERFIS DE VAZÃO	62
5.2 MODELAGEM HIDRÁULICA SETOR POÇOS	66
5.3 RESULTADOS DA MODELAGEM HIDRÁULICA E DA CALIBRAÇÃO	74
5.3.1 MODELAGEM HIDRÁULICA DO SETOR DE ÁGUA DO FORNO.	75
5.3.2 RESULTADOS CALIBRAÇÃO	80
6 DISCUSSÃO.....	91
7 CONCLUSÃO.....	95
REFERÊNCIAS.....	97

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - MODELAGEM HIDRÁULICA EM EPANET.....	31
FIGURA 2 - CALIBRAÇÃO DE MODELO HIDRÁULICO.....	35
FIGURA 3 - SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DE PLANTA INDUSTRIAL.	42
FIGURA 4 - SISTEMA DE CAPTAÇÃO DOS POÇOS.....	43
FIGURA 5 - SISTEMA DE CAPTAÇÃO DO SETOR DE UTILIDADES.....	45
FIGURA 6 - METODOLOGIA DE ANÁLISE PARA LEVANTAR HISTÓRICO DE CONSUMO.....	46
FIGURA 7 - PERFIL DE CONSUMO MÉDIO.....	47
FIGURA 8 - DEFINIÇÃO DO CUSTO ENERGÉTICO POR KWH.....	50
FIGURA 9 - CURVA DE OPERAÇÃO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA.....	52
FIGURA 10 - MODELAGEM SETOR DE DISTRIBUIÇÃO ÁGUA DO FORNO.	55
FIGURA 11 - ALGORITMO DE CALIBRAÇÃO DOS DADOS DE VAZÃO.....	57
FIGURA 12 - PERFIL MÉDIO MENSAL DE CONSUMO DA ÁGUA DOS POÇOS. .	63
FIGURA 13 - SOMA DAS VAZÕES PARA CADA MÊS.....	64
FIGURA 14 - PERFIL DE VAZÃO SEMANAL.....	65
FIGURA 15 – SOMA DA VAZÃO POR DIA DA SEMANA.	66
FIGURA 16 – MODELAGEM HIDRÁULICA DO SETOR DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA DOS POÇOS.....	67
FIGURA 17 - PADRÃO DE CONSUMO DE ÁGUA NO EPANET.	68
FIGURA 18 - PADRÃO DO PREÇO DA ENERGIA.	69
FIGURA 19 - CAPACIDADE MÁXIMA DE VAZÕES DAS BOMBAS E PERFIL DE CONSUMO.....	70
FIGURA 20 - PADRÃO DE VELOCIDADE DAS BOMBAS.....	71
FIGURA 21 - DADOS DE CUSTO ANUAL.....	72
FIGURA 22 - GRÁFICO DO PAYBACK.....	73
FIGURA 23 - DADOS DE VAZÃO BOMBEADOS.....	74

FIGURA 24 - MODELAGEM HIDRÁULICA DO SETOR DE ÁGUA DO FORNO.....	75
FIGURA 25 - MODELAGEM HIDRÁULICA DO SETOR DE ÁGUA DO FORNO COM A BIBLIOTECA WNTR.	76
FIGURA 26 - RESULTADOS DAS DEMANDAS NOS NÓS.	77
FIGURA 27 - RESULTADOS DA PRESSÕES NOS NÓS.	78
FIGURA 28 - RESULTADOS DAS VAZÕES NOS TRECHOS.	79
FIGURA 29 - RESULTADOS DAS PERDAS DE CARGA NOS TRECHOS.	79
FIGURA 30 - VALORES DE CONVERGÊNCIA DO ALGORITMO EE DAS SIMULAÇÕES.....	81
FIGURA 31 - RESULTADOS DO ALGORITMO EE DAS VAZÕES NO TRECHO P5.	82
FIGURA 32 - RESULTADOS DO ALGORITMO EE DAS VAZÕES NO TRECHO P2.	83
FIGURA 33 - RESULTADOS DO ALGORITMO EE DAS VAZÕES NO TRECHO P7.	84
FIGURA 34 - RESULTADOS DO ALGORITMO EE DAS PRESSÕES NO N04.....	85
FIGURA 35 - RESULTADOS DO ALGORITMO EE DAS PRESSÕES NO N05.....	86
FIGURA 36 - RESULTADOS DO ALGORITMO EE DAS PERDAS DE CARGA NO TRECHO P5.....	87
FIGURA 37 - RESULTADOS DO ALGORITMO EE DAS PERDAS DE CARGA NO TRECHO P4.....	88
FIGURA 38 - RESULTADOS DO ALGORITMO EE DAS PERDAS DE CARGA NO TRECHO P7.....	89

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS DOS POÇOS E BOMBAS.....	44
TABELA 2 - CARACTERÍSTICAS DOS TANQUES.....	45
TABELA 3 - CUSTO ENERGÉTICO DA NEOENERGIA PE.....	50
TABELA 4 - CONVERGÊNCIA DO ALGORITMO EE.....	80

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AE	Algoritmos Evolutivos
ACO	Otimização por Colônia de Formigas
AG	Algoritmos Genéticos
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
EBA	European Banking Authority
EE	Estratégias Evolutivas
ESG	Environmental, Social, and Governance
EPANET	Environmental Protection Agency Network
ETA	Estações de Tratamento de Água
ED	Evolução Diferencial
GLMA	Gauss-Levenberg-Marquardt Algorithm
LQG	Linear Quadratic Gaussian
MVR	Multivolume de Regulação
MOEA	Multi-Objective Evolutionary Algorithm
MQP	Mínimos Quadrados Ponderados
PI	Proportional-Integral
PG	Programação Genética
PSP	Pump Scheduling Problem
PRORET	Procedimentos de Regulação Tarifária
PQ	Programas Quadráticos
REN	Resolução Normativa
RNF	Reservatório de Nível Fixo
RNV	Reservatório de Nível Variado
SAA	Sistemas de Abastecimento de Água
SCE	Shuffled Complex Evolution
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
VFD	Variable Frequency Drive
VRPs	Válvulas Redutoras de Pressão
WNTR	Water Network Tool for Resilience

RESUMO

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E MODELO DE CALIBRAÇÃO EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA.

Este estudo analisou a eficiência energética e a calibração do modelo hidráulico do Sistema de Abastecimento de Água (SAA) de uma fábrica de vidros planos. O objetivo foi otimizar o acionamento das bombas dos poços e calibrar o modelo hidráulico, permitindo estimar com maior precisão as variáveis hidráulicas e, assim, aprimorar a operação da rede de distribuição de água da fábrica. A pesquisa, de abordagem quantitativa e operacional, foi aplicada ao SAA de uma fábrica localizada em Goiânia, Pernambuco. Foram realizadas simulações no software EPANET, com o intuito de minimizar as diferenças entre as vazões simuladas e aquelas obtidas por meio de um Algoritmo Evolutivo implementado em Python. A análise incluiu a realização de balanços hidroenergéticos e a calibração do modelo por meio de processos evolutivos iterativos. Além disso, foram coletados e analisados dados de consumo de água para propor estratégias de acionamento do sistema de bombeamento, visando a eficiência energética por meio da operação com inversores de frequência. Os resultados demonstraram a eficácia da metodologia adotada para otimização do SAA. A análise dos dados de vazão e dos perfis de consumo horários permitiu identificar os períodos de maior e menor demanda, subsidiando a definição de estratégias operacionais mais eficientes. A avaliação dos dados históricos de vazão possibilitou a proposição de um modelo de acionamento das bombas que resultou em redução dos custos energéticos. Considerando o cenário anual, a análise econômica indicou que o investimento de inversores nas bombas com maior vazão na saída dos poços apresenta viabilidade financeira, com retorno de investimento estimado em menos de 18 meses. A modelagem hidráulica realizada com o EPANET, aliada à calibração baseada em algoritmos evolutivos, proporcionou estimativas precisas de pressões e vazões, refletindo a operação real da planta com maior exatidão. Os erros relativos ficaram abaixo de 3% para as vazões pressões e inferiores a 5% para as perdas de carga nos trechos, demonstrando a confiabilidade da abordagem adotada. Este estudo contribui significativamente para a modelagem hidráulica e a eficiência energética em sistemas de abastecimento de água, ressaltando a importância da calibração do modelo e da análise dos perfis de consumo na busca por uma operação mais eficiente da rede de distribuição.

Descritores: Sistemas de Abastecimento de Água, Eficiência Energética, Operação de bombas, Algoritmos Evolutivos, Modelagem Hidráulica.

ABSTRACT

ANALYSIS OF ENERGY EFFICIENCY AND CALIBRATION MODEL IN WATER SUPPLY SYSTEMS

This study analyzed the energy efficiency and calibration of the hydraulic model of the Water Supply System (WSS) of a flat glass manufacturing plant. The objective was to optimize the operation of well pumps and calibrate the hydraulic model, enabling a more accurate estimation of hydraulic variables and, consequently, improving the operation of the plant's water distribution network. The research, which follows a quantitative and operational approach, was applied to the WSS of a factory located in Goiânia, Pernambuco. Simulations were conducted using the EPANET software to minimize discrepancies between the simulated flow rates and those obtained through an Evolutionary Algorithm implemented in Python. The analysis included hydro-energy balance calculations and model calibration through iterative evolutionary processes. Additionally, water consumption data were collected and analyzed to propose pump operation strategies, aiming at energy efficiency through the use of frequency inverters. The results demonstrated the effectiveness of the methodology adopted for optimizing the WSS. The analysis of flow rate data and hourly consumption profiles allowed for identifying peak and off-peak demand periods, supporting the definition of more efficient operational strategies. The evaluation of historical flow rate data enabled the proposal of a pump operation model that resulted in reduced energy costs. Considering the annual scenario, the economic analysis indicated that investing in inverters for pumps with higher flow rates at the well outlets is financially viable, with an estimated return on investment in less than 18 months. The hydraulic modeling conducted with EPANET, combined with calibration based on evolutionary algorithms, provided accurate estimates of pressures and flow rates, closely reflecting the real operation of the plant. The relative errors remained below 3% for flow rates and pressures and under 5% for head losses in the pipeline sections, demonstrating the reliability of the adopted approach. This study makes a significant contribution to hydraulic modeling and energy efficiency in water supply systems, highlighting the importance of model calibration and consumption profile analysis in the pursuit of a more efficient water distribution system operation.

Key words: Water Supply Systems, Energy Efficiency, Pump Operation, Evolutionary Algorithms, Hydraulic Modeling.

1 INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

O melhor aproveitamento energético, com menor consumo de energia na realização de um mesmo trabalho sem comprometer o desempenho ou a qualidade, é entendido como eficiência energética (Costa; Junior, 2021). O uso otimizado da energia pode ser alcançado em qualquer fase, seja no processo de geração, conversão ou no consumo final da energia elétrica (Souza; Silva; Fontanelle; *et al.*, 2019). Para alcançar eficiência energética, é possível implementar diversas ações que melhorem o desempenho de equipamentos e sistemas, permitindo uma operação mais eficiente. Essas ações podem ser aplicadas em vários setores, como os Sistemas de Abastecimento de Água (SAA) (Luna; Ribau; Figueiredo *et al.*, 2018).

Os SAA são projetados para fornecer água potável com a qualidade, pressão e vazão desejadas para os consumidores. Esses sistemas envolvem seis etapas principais: captação, tratamento, elevação, transporte, armazenamento e distribuição da água (Luna; Ribau; Figueiredo *et al.*, 2018). As infraestruturas incluem: reservatórios, Estações de Tratamento de Água (ETA), tanques de armazenamento, tubos, válvulas e estações de bombeamento (Gomes, 2019).

O processo começa com a coleta e bombeamento de água bruta para a ETA, onde o tratamento e a demanda energética variam conforme as características da água captada. Após o tratamento, a água é transportada para tanques de armazenamento e, em seguida, distribuída aos consumidores. Esse transporte pode utilizar bombeamento em sistemas pressurizados, ou a energia potencial gravitacional para mover a água através das tubulações (Gomes, 2019).

Os SSA das indústrias podem ter sistemas de captação de água distintos. Algumas utilizam o SSA da companhia de água e esgoto local, enquanto outras captam o recurso hídrico do lençol freático e realizam todas as etapas posteriores internamente. O sistema de bombeamento para a captação de água requer o acionamento de conjuntos motobomba, cuja sequência de entrada depende do consumo da SAA e do horário desse consumo (Marchi; Simpson; Lambert, *et al.*, 2017). Em muitos sistemas, a potência elétrica do conjunto motobomba é elevada, resultando em altos custos operacionais, especialmente nos horários de ponta, definidos pela concessionária conforme a Resolução Normativa (REN) nº 1.000/2021 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (ANEEL, 2021).

Para melhorar a eficiência do funcionamento do SAA, pode ser utilizada abordagens de otimização, como a programação das operações de bombeamento (Luna; Ribau; Figueiredo *et al.*, 2018). A identificação do perfil de consumo é realizada a partir da verificação dos horários de maior consumo de água da fábrica e estimar a melhor configuração de acionamento das bombas, com o objetivo de otimizar a potência elétrica e minimizar os custos de energia (Luna; Ribau; Figueiredo *et al.*, 2018). No contexto industrial entender os horários de maior e menor consumo de água e a identificação de demandas inesperadas, auxiliam no controle do balanço hídrico do SAA.

No contexto da otimização do sistema de água, considerando o balanço hídrico e os custos energéticos, a adoção de práticas eficientes e sustentáveis alinha-se diretamente aos critérios Environmental, Social, and Governance (ESG), que significa em português brasileiro: Ambiental, Social e Governança; e representa critérios fundamentais na análise de investimentos e tomada de decisões empresariais. As métricas ambientais da ESG, definidas pela European Banking Authority (EBA), abrangem emissões de gases de efeito estufa, eficiência energética, poluição do ar, gestão de água, resíduos, impactos na biodiversidade e ecossistemas (LI; Wang; Sueyoshi *et al.*, 2021).

Compreende-se que para promover a gestão da água no SAA, a obtenção de dados, com a instalação de sensoriamento ou por estimativas de variáveis hidráulicas, essa última, pode ser realizada com ferramentas e modelos de simulação hidráulica que são utilizados para analisar o comportamento dos SAA, por meio dados de vazão, pressão e outras variáveis inerentes aos modelos (Figueiredo; Esteves; Cabrita, 2021). A modelagem hidráulica desempenha um papel crucial ao emular a operação do sistema de abastecimento do cotidiano industrial, especialmente em situações onde há falta de informações precisas de sensoriamento nos trechos e nós do sistema. Isso possibilita estimar o comportamento simulado do SAA.

Em contextos operacionais, o comportamento do SAA pode apresentar dados distintos do modelo simulado. Em virtude disso, a calibração de modelos hidráulicos é um processo que ajusta parâmetros do SAA para minimizar as diferenças entre os resultados da simulação e as medidas reais de operação (Zanfei; Menapace; Santopietro *et al.*, 2020). Os processos de calibração utilizam algoritmos, sendo os algoritmos metaheurísticos amplamente empregados para refinar os valores das

variáveis hidráulicas por meio de processos interativos, como ajuste dos coeficientes de rugosidade das tubulações (Shiu; Chung; Chiang, 2023). Isso assegura que a simulação do modelo esteja alinhada com o comportamento real do sistema. A calibração do SAA contribui de maneira precisa para o gerenciamento do balanço hídrico, auxiliando na tomada de decisões sobre a eficiência hidráulica e energética, com base nos dados em tempo real inseridos ao modelo simulado.

Diante do contexto apresentado, propõe-se uma análise de eficiência energética e calibração do modelo do SAA de uma fábrica de vidros planos para auxiliar na operação e na tomada de decisão de rede de distribuição de água. O trabalho contribui com a proposta de compreender o perfil de consumo de água, considerando variações e cenários de baixa e alta demanda, para estabelecer um perfil de acionamento das bombas dos reservatórios que maximize a eficiência energética no SAA industrial, considerando horários de consumo e a potência da carga.

Além disso, a calibração das variáveis hidráulicas das tubulações do SAA é essencial para aproximar o modelo da rede a operação real, utilizando técnicas metaheurísticas iterativas que incorporam dados em tempo real para aprimorar continuamente o modelo simulado da rede da fábrica de vidros. Dessa forma, a permitir a tomada de decisões com base na operação do SAA calibrado.

Dentro do contexto em análise, a proposta visa fortalecer os indicadores ESG industriais e orientar decisões que promovam a gestão ambiental e a utilização do recurso hídrico de forma consciente, por meio da eficiência da operação e da compreensão das perdas hidráulicas do sistema de distribuição de água.

Considerando o exposto, o estudo proposto será orientado pela seguinte questão de pesquisa: Com base no texto, uma pergunta de pesquisa relevante poderia ser: Como a calibração do modelo hidráulico e a análise da eficiência energética podem otimizar o desempenho e reduzir os custos operacionais de um SAA em uma fábrica de vidros planos, considerando variações de demanda e horários de consumo?

1.1 OBJETIVO GERAL

Apresentar estudo de eficiência energética para o acionamento de bombas dos poços e calibrar as variáveis hidráulicas de modelo de SAA com finalidade de auxiliar na eficiência da operação.

1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar o cenário ideal de acionamento das bombas dos poços de um SAA industrial visando maximizar a eficiência energética com utilização do histórico consumo de água.
- Propor modelagem hidráulica em EPANET com regras de acionamento das bombas baseada na minimização dos custos da energia elétrica e implementação de inversor de frequência.
- Apresentar um estudo de viabilidade econômica para a instalação do inversor de frequência, incluindo a análise de Payback, Taxa Interna de Retorno (TIR) e Valor Presente Líquido (VPL).
- Modelar o SSA de análise em ferramenta de modelagem e implementar técnica metaheurística de Estratégias Evolutivas para calibração das variáveis hidráulicas que permite atualização do modelo com os dados do SSA industrial em operação.

1.2 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Este trabalho contribuiu para a gestão operacional de um SAA industrial, com as seguintes aplicações:

- Estimativa de variáveis hidráulicas em pontos da rede sem sensoramento, com a modelagem hidráulica realizada no EPANET.
- Proposta de análise da eficiência energética para a redução dos custos energéticos operacionais do bombeamento dos poços por meio do critério de entrada das bombas e a implementação dos inversores de frequência.
- Calibração do modelo hidráulico de um setor da fábrica, permitindo que as estimativas hidráulicas obtidas do modelo em EPANET estejam alinhadas a operação real da rede de distribuição de água.

1.3 ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi estruturado para atender às propostas de melhoria para a planta de estudo, seguindo o rigor científico exigido. Além deste capítulo introdutório, esta dissertação está organizada em mais sete capítulos, estruturados de forma a garantir

a coerência e o encadeamento da pesquisa. A seguir, apresenta-se a descrição de cada capítulo, destacando sua contribuição para o desenvolvimento do estudo.

- Capítulo 2: O capítulo apresenta revisão de literatura sobre a temática do estudo.
- Capítulo 3: O presente capítulo busca apresentar a fundamentação teórica que foi base para o desenvolvimento do presente trabalho.
- Capítulo 4: Tem como objetivo detalhar os processos desenvolvidos na construção da pesquisa. Nessa etapa, serão abordados o perfil de consumo da fábrica, a aplicação do custo tarifário para consumidores do Grupo A, a modelagem hidráulica no EPANET, a implementação do inversor de frequência e o estudo de viabilidade econômica associado à sua instalação, além da aplicação do algoritmo de Estratégias Evolutivas para a calibração da rede.
- Capítulo 5: O capítulo de resultados detalha os achados resultantes da aplicação da metodologia delineada no estudo.
- Capítulo 6: O capítulo de discussão compara os resultados obtidos neste estudo com aqueles de trabalhos que propuseram abordagens semelhantes para a operação de sistemas de abastecimento de água, com foco na modelagem hidráulica, eficiência energética e calibração de modelos hidráulicos.
- Capítulo 7: O capítulo de conclusão apresenta uma síntese dos principais resultados obtidos nesta pesquisa, evidenciando suas contribuições para a operação de sistemas de abastecimento de água. Além disso, são discutidas propostas para trabalhos futuros que possam complementar e aprofundar os achados desta dissertação.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2 REVISÃO DE LITERATURA

Nesta etapa, foi realizada uma revisão de literatura para orientar a construção do trabalho. A pesquisa foi conduzida no portal de Periódicos Capes, por meio da plataforma CAFE. Os artigos foram selecionados no período de 2016 a 2024, com buscas feitas utilizando o operador booleano AND. Para abranger o escopo do estudo utilizou-se três estratégias de busca com os seguintes descritores: 1) “energy efficiency AND water pumps AND water supply systems”, 2) “pump scheduling AND pump control using VFD AND energy efficiency”, 3) “pumping systems optimization AND variable frequency drive (VFD) AND energy efficiency” e 4) “genetic algorithms AND water distribution systems AND hydraulic model”.

Como critério de inclusão, foram considerados artigos originais na íntegra e com acesso livre nas línguas inglês, português e espanhol. Foram excluídos artigos repetidos e aqueles que não abordavam a temática do estudo. Após essa etapa, realizou-se uma categorização e foram extraídos dos estudos os seguintes dados: título do artigo, ano de publicação, país de origem, autores, revista, idioma, objetivo do estudo, método e principais resultados.

Bouach e Benmamar (2019) propuseram a análise da otimização de sistemas de controle de abastecimento de água, com foco na eficiência energética e na qualidade do serviço. Utilizando simulações numéricas para avaliar três métodos de bombeamento e destacando o controle em tempo real e o método Multivolume de Regulação (MVR), os resultados demonstraram uma melhor distribuição de pressão e maior eficiência energética. Essa análise exemplifica como a otimização de controle pode contribuir para a eficiência energética.

Kikomeko e Sempewo (2021) desenvolveram cronogramas de operação de bombas para melhorar a eficiência energética nos sistemas de abastecimento de água da NWSC, em Uganda. Por meio de técnicas de amostragem estatística e análise de regressão, o estudo revelou que a reprogramação das bombas para horários de menor demanda reduziu significativamente o consumo de energia e os custos operacionais. Esses resultados evidenciam o impacto da programação inteligente de bombas na eficiência do sistema, uma abordagem que pode ser integrada aos métodos de otimização descritos por Bouach e Benmamar (2019).

Nikolenko e Ryzhakov (2019) propuseram a otimização da escolha das bombas e seu modo de operação em estações de bombeamento de sistemas de abastecimento de água com tanque de reserva. Utilizando um modelo matemático de otimização não linear e multicritério resolvido por um algoritmo genético, o estudo teve como objetivo minimizar o custo diário de energia elétrica e maximizar a eficiência das bombas centrífugas. Este foco em otimização e redução de custos é consistente com as estratégias exploradas em outros estudos, como o de Zhou, Mui e Wong (2019), que também visam melhorar a eficiência energética.

Kapanski, Hruntovich, Bakhur *et al.* (2020) propuseram otimizar os custos de eletricidade em sistemas de abastecimento de água utilizando tanques acumuladores. Eles desenvolveram um método para otimizar a operação das bombas, considerando sistemas de pagamento de energia elétrica e implementando um algoritmo para avaliar o potencial econômico da regulação das bombas. A busca por soluções que minimizem o consumo específico de eletricidade e operem bombas em períodos diferenciados do dia complementa as estratégias de otimização discutidas por Nikolenko e Ryzhakov (2019).

Candilejo, Santillán e Garrote (2019) buscaram melhorar a determinação dos custos de energia em sistemas de abastecimento de água, analisando 226 bombas comerciais para registrar sua eficiência no ponto de operação ótimo e outras variáveis. A pesquisa resultou na geração de uma curva empírica para prever a eficiência da bomba, que pode ser aplicada para avaliar a eficiência energética e reduzir custos operacionais. Este foco em desempenho e eficiência alinha-se às abordagens discutidas anteriormente, como a otimização dos métodos de controle e operação das bombas.

Os artigos analisam a eficiência energética em sistemas de bombeamento, propondo metodologias que incluem controle preditivo simples para agendamento em tempo real de bombas como apresentados em Salomons e Housh (2020) e a otimização de sistemas de acionamento elétrico com motores de alta eficiência e inversores de frequência Ivanova e Ivanov (2020). A análise e otimização de sistemas de bombas centrífugas também são abordadas, destacando a importância do uso de inversores de frequência para melhorar a eficiência operacional Luo; Xiong, Sun *et al.* (2017). Além disso, a variação da velocidade do motor, controlada por um drive de

frequência, é discutida como uma forma de otimizar o fluxo e reduzir a resistência hidráulica como apresenta Gan, Pei, Pavesi *et al* (2022).

O controle das bombas é um tema central, com ênfase na modulação da frequência de pulso para ajustes finos na velocidade das bombas Gan, Pei e Pavesi *et al* (2022). O controle de velocidade variável é considerado o método mais eficiente em termos de energia para a regulação de sistemas de bombas, permitindo uma adaptação mais eficiente às demandas do sistema Gan, Pei, Pavesi *et al* (2022). O artigo de Torregrossa e Capitanescu (2018) também destaca a importância da otimização dinâmica e estática para gerenciar a ativação das bombas, minimizando o consumo de energia e evitando problemas como cavitação e transbordamento.

Os estudos discutem a relação entre eficiência energética e redução de custos operacionais, enfatizando a importância de considerar o custo do ciclo de vida das bombas Menke, Abraham e Stoianov (2016). A implementação de tecnologias de controle inteligente é mencionada como uma forma de gerar economias significativas a longo prazo Menke, Abraham e Stoianov (2016). Além disso, a análise econômica é considerada essencial para justificar as melhorias na eficiência energética, com diretrizes para calcular a eficiência econômica das implementações como abordam em seu artigo Ivanova e Ivanov (2020).

A falta de modelos que considerem projeções futuras de demanda e tarifas energéticas limita o planejamento estratégico de sistemas de bombeamento de água. Além disso, a exploração insuficiente do histórico e das variações de vazão compromete a operação eficiente desses sistemas. Diante desse cenário, a modelagem hidráulica torna-se uma ferramenta essencial para otimizar o desempenho e reduzir custos.

O artigo de Shiu, Chung e Chiang (2023) propõe a otimização do modelo hidráulico Environmental Protection Agency Network (EPANET) por meio de algoritmos genéticos (GA), visando ajustar os coeficientes de rugosidade das tubulações e, assim, aprimorar a precisão das simulações hidráulicas em sistemas de distribuição de água. A metodologia envolve o pré-processamento de dados, a incorporação de características espaciais, avaliação de desempenho e comparação com o software WaterGEMS. Os resultados obtidos com o EPANET-GA demonstraram sua capacidade de identificar múltiplas soluções, o que torna essa abordagem uma ferramenta eficaz para a calibração e otimização de redes de

abastecimento de água. A partir dessa estratégia, outras abordagens de otimização também foram exploradas para melhorar a eficiência e reduzir os custos nos sistemas de abastecimento de água.

O estudo de Bi, Xu e Wang (2020) comparou o desempenho de diferentes algoritmos de otimização, como Algoritmos Genéticos (AG), Evolução Diferencial (ED) e Otimização por Colônia de Formigas (ACO), no design de sistemas de distribuição de água. Os resultados evidenciam as diferenças de desempenho entre essas metodologias, oferecendo insights sobre a escolha mais adequada de métodos de otimização, complementando as abordagens discutidas por Shiu, Chung e Chiang (2023).

Maskit e Ostfeld (2021) propuseram um estudo focado na otimização de sistemas de distribuição de água com o objetivo de minimizar vazamentos e o custo total de energia. Para isso, utilizaram um modelo de otimização iterativa e multi-objetivo. Este enfoque destaca a importância de considerar múltiplos objetivos e diferentes estratégias de otimização para melhorar a operação dos sistemas de abastecimento de água, promovendo uma maior eficiência energética e controle de vazamentos.

Em continuidade, Zhao, Wu, Simpson et al. (2022) abordaram a calibração de modelos hidráulicos ajustando os valores de rugosidade das tubulações por meio de métodos de otimização, como os Algoritmos Genéticos (AG) e Evolução Diferencial (ED). Este estudo corrobora a eficácia das técnicas de otimização no processo de calibração de modelos e complementa as abordagens discutidas anteriormente.

Além disso, Tao, Yan, Yang et al. (2022) propuseram uma otimização para redes de distribuição de água, focando na escolha dos diâmetros de tubos que equilibram custos e desempenho no fornecimento de água. Para isso, utilizaram o algoritmo NSGA-II em conjunto com o software EPANET. Essa combinação de métodos de otimização e modelagem hidráulica oferece soluções eficientes e econômicas, consolidando as estratégias de otimização abordadas nos estudos anteriores.

Em termos de eficiência energética e gestão de recursos, a revisão de literatura revelou o progresso das abordagens de otimização nos sistemas de abastecimento de água, com destaque para o uso de algoritmos genéticos na calibração e no ajuste de diâmetros de tubos, como evidenciado nos estudos de Shiu, Chung e Chiang (2023) e Nikolenko e Ryzhakov (2019). Outros estudos, como os de Zhou, Mui e Wong

(2019) e Bouach e Benmamar (2019), ressaltam a importância das simulações para garantir a eficiência energética dos sistemas.

Outras abordagens significativas incluem os métodos de reprogramação de bombas e otimização de tanques acumuladores, apresentados por Kikomeko e Sempewo (2021), e Kapanski, Hruntovich, Bakhur et al. (2020). Além disso, o impacto da gestão inteligente de emergências foi analisado por Tahiri, Che, Ladeveze et al. (2022), que enfatizam a importância da aplicação de técnicas de otimização para garantir o abastecimento de água, mesmo em situações críticas.

Apesar dos avanços na área, a revisão evidenciou lacunas significativas que demandam maior investigação. Em particular, é crucial aprofundar os estudos sobre a integração da modelagem hidráulica com aplicações práticas em cenários industriais, focando especialmente na melhoria da eficiência energética. Embora muitos artigos tratem da redução imediata dos custos operacionais, há uma carência de análises econômicas de longo prazo, como o retorno sobre os investimentos em tecnologias de eficiência energética e a avaliação dos custos de manutenção. Além disso, observa-se uma lacuna nas modelagens hidráulicas aplicadas a sistemas de abastecimento industrial e na utilização de técnicas metaheurísticas nos processos de calibração, o que limita uma gestão eficiente da operação dos sistemas de distribuição de água.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, apresenta-se a fundamentação teórica que embasa o desenvolvimento deste trabalho. A revisão bibliográfica aborda os seguintes temas: Sistemas de Abastecimento de Água (SAA), modelagem hidráulica e inversores de frequência. Essas informações são essenciais para compreender a aplicação da eficiência energética em sistemas de bombeamento de água e a consequente redução dos custos operacionais.

Além disso, a modelagem hidráulica, a calibração de modelos hidráulicos e a implementação do algoritmo de Estratégias Evolutivas (EE) têm como objetivo estimar parâmetros em pontos não sensorizados da rede de distribuição e calibrar os dados de vazão nos trechos monitorados.

3.1 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

O sistema de abastecimento de água, consiste em redes projetadas para transportar água potável das fontes de abastecimento até os consumidores finais, incluindo indústrias. Essa rede é composta por tubulações, válvulas, bombas, reguladores e reservatórios que trabalham juntos para fornecer água de forma eficiente e confiável, mantendo a pressão adequada para atender às necessidades dos usuários (Parvaze; Kumar; Khan *et al.*, 2023).

A demanda de água é um fator crucial no planejamento e operação dos sistemas de abastecimento. Estimar a demanda de água de forma precisa é essencial para garantir que a rede de abastecimento possa fornecer água suficiente para atender às necessidades dos consumidores. Além disso, a compreensão detalhada da demanda de água contribui diretamente para a eficiência energética no sistema de abastecimento, pois em sistemas de bombeamento de água a demanda de energia elétrica é elevada e o custo energético significativo (Kapanski; Hruntovich; Bakhur *et al.* 2020). A operação otimizada das bombas e a gestão eficiente dos reservatórios, possibilitada por uma previsão da demanda, podem reduzir significativamente o consumo de energia.

3.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A eficiência energética de um sistema de abastecimento de água pode ser avaliada através da análise do balanço energético, que considera a energia fornecida e consumida (Andraka; Kruszynski; Tyniec *et al.*, 2023). A eficiência energética é uma ação que pode ser utilizada para otimizar o SAA, ela ocorre após a identificação de pontos críticos na rede como a perda de energia com vazamentos, regime operacional dos níveis dos reservatórios, perdas em válvulas e perdas de carga nas tubulações. A identificação dos pontos críticos da rede de abastecimento de água, inclui a análise do balanço energético do sistema. Metodologias como a auditoria energética abrangente, que empregam ferramentas de modelagem hidráulica, como o software EPANET, podem ser utilizadas para estimar indicadores de eficiência energética e identificar oportunidades de melhoria.

A modelagem hidráulica é essencial para a implementação da eficiência energética nos SAA. Essa ferramenta permite a programação de válvulas e bombas para reduzir perdas de carga nas tubulações e otimizar as pressões na rede, além de possibilitar a simulação de diferentes cenários operacionais. Também auxilia na tomada de decisões ao identificar áreas com perdas de carga e dimensionamento inadequado dos componentes, contribuindo para a otimização do sistema e a aplicação de estratégias de eficiência energética (Reis; Lopes; Campos *et al.*, 2023).

Para o entendimento do sistema, a modelagem hidráulica quando combinada com metodologias heurísticas e métodos matemáticos, facilita a tomada de decisões e a coordenação de ações para otimizar o balanço energético e a operação de reservatórios, de válvulas e do sistema de bombeamento de água ao longo do dia. Essas estratégias aprimoram a dinâmica e promovem eficiência hidroenergética ao SAA.

Outro método de avaliação de desempenho do SAA é o mapeamento do balanço energético. Essa identificação proporciona significativa ação na gestão operacional, pois aponta pontos de intervenção que pode contribuir com a redução do consumo de energia nas estações de bombeamento e minimização das perdas de energia no sistema de distribuição de água (Luna; Ribau; Figueiredo *et al.*, 2018).

A ferramenta EPANET é um software utilizado para estimar indicadores que auxiliam na busca pela eficiência energética. Ao modelar as características do SAA,

como diâmetro, comprimento e material das tubulações, ele também permite simular diferentes configurações de bombas, operações de válvulas e níveis de operação dos tanques. Essas simulações ajudam a avaliar diversas combinações de válvulas e identificar as opções mais eficientes. Para potencializar essa análise e otimizar o tempo de operação das bombas, aplica-se a formulação do problema por meio do Programa Não Linear Inteiro Misto (MINLP), que integra a otimização das operações de bombas e válvulas, permitindo a definição de estratégias operacionais mais eficientes e, assim, contribuindo significativamente para a redução do consumo energético do SAA (Kurian; Chinnusamy; Natarajan *et al.*, 2018).

A utilização de inversores de frequência é outra proposta de alcance da eficiência energética de sistema de bombeamento de uma SAA. Esse componente permite que seja modificada a variação da velocidade de rotação das bombas, ajustando-a de acordo com os indicadores de consumo de água e o custo energético dos diferentes horários. Com a adaptação da operação do sistema de bombeamento aos níveis dos tanques e aos períodos de maior e menor demanda, é possível reduzir os custos com energia elétrica e otimizar o desempenho do bombeamento de água (Diniz; Fontes; Costa *et al.*, 2015).

Os algoritmos genéticos são aplicados nos sistemas de distribuição de água para otimizar parâmetros hidráulicos, como os diâmetros das tubulações, por meio de um processo evolutivo que busca soluções mais eficientes. A perda de carga aumenta a resistência ao escoamento, exigindo maior esforço das bombas para manter a vazão, elevando o consumo de energia. Dessa forma, a otimização dos diâmetros das tubulações reduz essas perdas, minimiza o consumo energético das bombas e contribui para a redução dos custos operacionais da rede (Miller; Trifunovic; Kennedy; *et al.*, 2024).

Os Algoritmos Genéticos podem otimizar a operação dos sistemas de bombeamento ao ajustar dinamicamente os níveis máximo e mínimo dos reservatórios de água. Esse modelo de otimização regula o acionamento das bombas conforme a demanda da rede, buscando reduzir o consumo energético e garantir o equilíbrio operacional do sistema (Egito; Azevedo; Bezerra, 2022).

Para o acionamento de bombas uma ferramenta que auxilia na identificação do melhor acionamento é o problema de agendamento de bombas (PSP) que visa minimizar o consumo de energia das bombas nos SAA, mantendo o fluxo, a pressão

e os níveis de água nos tanques adequados, conforme a operação da rede de distribuição. A formulação matemática do PSP permite identificar variáveis e restrições que afetam o consumo de energia, considera diferentes regimes de velocidade das bombas e o custo de eletricidade. Simulações são realizadas para testar diversos cenários operacionais, e regras operacionais são integradas ao modelo para alinhar as ações de eficiência energética com as necessidades práticas do sistema (Bagloee; Asadi; Patriksson, 2018).

A eficiência energética nos sistemas de abastecimento de água pode ser alcançada através da otimização da operação, utilizando ferramentas de modelagem hidráulica, algoritmos genéticos e análises matemáticas. Todas essas abordagens possuem os objetivos em comum, reduzir os custos energéticos, melhorar a gestão do sistema e auxiliar na tomada de decisões, promovendo uma operação mais eficiente do ponto de vista hidroenergético.

3.3 MODELAGEM HIDRAÚLICA

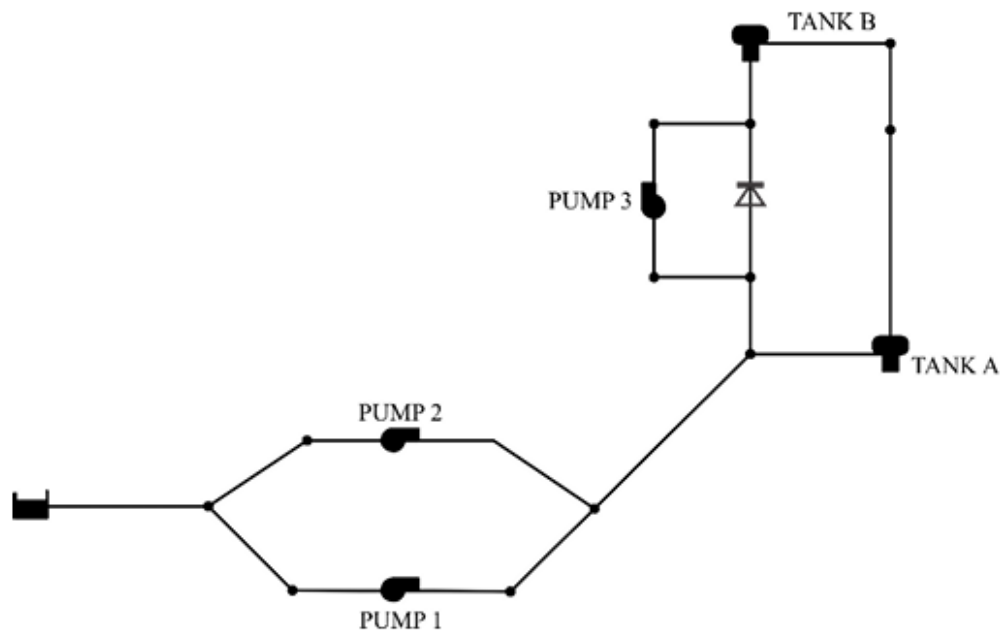
A modelagem hidráulica do SAA envolve a simulação do comportamento da água dentro de uma rede de distribuição, composta por tubulações, reservatórios, bombas e válvulas (Raja; Satish; Upendra *et al.*, 2021). A modelagem hidráulica utiliza softwares como o EPANET para análise de redes de distribuição de água e o Storm Water Management Model (SWMM) para modelar redes de tratamento de água. Além disso, pode ser realizada em ambientes de computação numérica, como o Matlab, é modelada por meio de equações não lineares e métodos numéricos matemáticos para a compreensão da rede.

A simulação da modelagem permite avaliar o comportamento da rede sob diversas condições operacionais. Os resultados dessas simulações fornecem informações detalhadas sobre o fluxo de água, a pressão em diferentes pontos da rede e as perdas de carga nas tubulações (Shiu; Chung; Chiang, 2023). Esses dados são essenciais para identificar possíveis problemas, como áreas de baixa pressão ou ineficiências no sistema, e para avaliar o impacto de diferentes cenários operacionais e configurações.

Ferramentas de software de simulação, como o EPANET, são amplamente usadas para criar modelos digitais da rede para obter parâmetros hidráulicos. Os

dados de entrada para a criação dos modelos incluem a topologia da rede, características dos componentes, demanda de água e condições operacionais (Serafeim; Perdios; Fourniotis *et al.*, 2023). A Figura 1 apresenta esse cenário.

FIGURA 1 - MODELAGEM HIDRÁULICA EM EPANET.
ERRO! FONTE DE REFERÊNCIA NÃO ENCONTRADA.



Fonte: (Egito; Azevedo; Bezerra, 2022). João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

A modelagem realizada no EPANET pode ser aplicada para estimativas de perda de água e identificação de falhas no controle de pressão, permitindo o mapeamento de pontos de falha na rede e a otimização do gerenciamento da demanda de água, visando reduzir significativamente o volume de água perdida e os custos financeiros associados a essas perdas (Serafeim; Perdios; Fourniotis *et al.*, 2023).

A técnica de Programação Genética (PG) é empregada na modelagem hidráulica, e apresenta como objetivo estimar, prever e simular fenômenos como escoamento de água, transporte de sedimentos e qualidade da água. Esse método permite a criação de modelos que capturam relações complexas entre variáveis, utilizando dados históricos para gerar equações que descrevem o comportamento hidráulico, resultando em previsões eficientes e aceitáveis sem a necessidade de identificação de sistemas físicos (Mohammad; Bozorg; Loáiciga, 2020).

Outra técnica possível é através do uso da modelagem matemática aplicada na Teoria dos Grafos, essa ferramenta é eficaz para a análise de controle de Válvulas Redutoras de Pressão (VRPs) em redes de distribuição de água. Essa abordagem permite representar e analisar a conectividade dos nós, facilita a avaliação do fluxo e da pressão em sistemas complexos com múltiplos nós, a partir dos dados de demanda. Assim, esse tipo de modelagem contribui para otimizar o controle de pressão e melhorar a eficiência do sistema de distribuição de água (Galuppini; Creaco; Toffanin, 2019).

A modelagem dinâmica utilizando a ferramenta computacional Matlab introduz uma descrição numérica do comportamento dinâmico da rede, permite simulações de diferentes casos e a identificação de um modelo linear local para controle. Para o dinamismo das previsões de descarga de água e para melhorar o desempenho do controle da simulação, essa técnica de modelagem implementa algoritmos como o Proportional-Integral (PI) e o Linear Quadratic Gaussian (LQG). Essa aplicação apresenta o mesmo objetivo da modelagem matemática, pois busca a regulação da pressão para reduzir vazamentos e otimizar a operação da rede de distribuição de água (Jahandideh-Tehrani; Bozorg-Haddad; Loáiciga, 2021).

Além disso, a modelagem hidráulica é utilizada para sistemas de tratamento de água, onde o SWMM é utilizado para simular o comportamento hidráulico da rede de drenagem e desenvolver estratégias de tratamento de água. O SWMM pode ser otimizado aplicando o algoritmo Borg Multi-Objective Evolutionary Algorithm (MOEA), e sua aplicabilidade propicia a eficiência ao minimizar os custos operacionais na planta de tratamento de água (Janga; Nagesh, 2020).

3.4 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Os inversores de frequência são dispositivos eletrônicos projetados para ajustar a velocidade, a tensão de entrada e a frequência de motores elétricos de acordo com a demanda de carga medida. Essa tecnologia é amplamente reconhecida por oferecer um controle eficiente do torque e da velocidade, permitindo que os motores operem próximos ao ponto de eficiência ideal e minimizando perdas energéticas (Kapp; Wang; McNelly *et al.*, 2024).

Uma das principais funcionalidades dos inversores de frequência é a capacidade de variar de forma adaptativa a frequência elétrica, otimizando o desempenho de sistemas de bombeamento e motores de indução em condições de operação variáveis. Isso é particularmente relevante em aplicações com cargas dinâmicas, como sistemas de bombeamento, irrigação e equipamentos industriais, onde o consumo energético se ajusta proporcionalmente à demanda. Estudos destacam que essa flexibilidade contribui significativamente para a redução do consumo energético e melhora a eficiência dos sistemas (Lavrič; Drobnič; Fišer, 2024; Azari; Rizi; Ashrafzadeh, 2020).

Nos ambientes industriais, os Inversores de frequência oferecem controle preciso sobre motores elétricos, otimizando suas velocidades de operação conforme as necessidades do processo. Essa adaptação resulta não apenas em economias substanciais de energia, mas também na redução da manutenção, uma vez que o desgaste mecânico é minimizado. Segundo pesquisas, a implementação de Inversores de frequência em motores industriais tem demonstrado impactos positivos significativos na redução dos custos operacionais e na sustentabilidade energética (Kapp; Wang; McNelly *et al.*, 2024; Lavrič; Drobnič; Fišer, 2024).

Em sistemas de bombeamento, os inversores de frequência desempenham um papel fundamental ao ajustar a operação das bombas conforme a variação na demanda. Essa capacidade de ajuste otimiza a pressão hidráulica, reduz perdas de energia e aumenta a eficiência operacional. Além disso, problemas operacionais como cavitação e sobrepressão são minimizados, o que prolonga a vida útil dos equipamentos e garante um controle hidráulico mais eficiente. Aplicações específicas, como irrigação pressurizada e sistemas industriais com demandas flutuantes, destacam-se como áreas em que os benefícios dos Inversores de frequência são amplamente comprovados (Azari; Rizi; Ashrafzadeh, 2020; Bordeasu; Prostean; Filip *et al.*, 2023).

A principal vantagem associada ao uso de inversores de frequência é a economia de energia, especialmente em aplicações com cargas variáveis. O ajuste da velocidade dos motores evita desperdícios energéticos, contribuindo para uma redução significativa nos custos operacionais e para o aumento da eficiência energética dos sistemas. Além disso, o controle de velocidade variável oferecido pelos Inversores de frequência reduz o desgaste mecânico dos motores, diminuindo a

frequência de manutenções corretivas e preventivas e prolongando a vida útil dos equipamentos (Luo; Xiong; Sun *et al.*, 2017; Kapp; Wang; McNelly *et al.*, 2024).

Contudo, a implementação de inversores de frequência exige uma análise econômica detalhada, considerando os custos iniciais de investimento e os potenciais benefícios ao longo do ciclo de vida dos sistemas. Estudos indicam que a combinação de Inversores de frequência com auditorias energéticas pode identificar oportunidades adicionais de otimização e amplificar as taxas de economia de energia. Esses dispositivos apresentam um retorno sobre o investimento particularmente atrativo em sistemas existentes que demandam alta flexibilidade operacional ou enfrentam elevadas flutuações de carga (Henrik Lavrič *et al.*, 2024; Luo; Xiong; Sun *et al.*, 2017).

Os inversores de frequência oferecem vantagens substanciais para aplicações industriais e de bombeamento, incluindo economia de energia, redução de custos operacionais, aumento da eficiência hidráulica e mecânica, e prolongamento da vida útil dos equipamentos. Embora o investimento inicial possa ser elevado, os ganhos em sustentabilidade e eficiência justificam amplamente sua adoção, especialmente em sistemas que apresentam cargas variáveis e condições de operação dinâmicas.

3.5 CALIBRAÇÃO DE MODELOS HIDRÁULICOS

A calibração é uma etapa crítica que ocorre após a modelagem hidráulica e é essencial para garantir a precisão e a utilidade dos modelos (Shiu; Chung; Chiang, 2023). A calibração assegura que o modelo digital represente com precisão a realidade operacional da rede (Serafeim; Perdios; Fourniotis *et al.*, 2023). Um modelo calibrado possibilita a otimização das operações, o planejamento eficaz de expansões e uma distribuição eficiente e segura da água. Esse processo envolve o ajuste dos parâmetros do modelo para assegurar que as simulações correspondam com precisão aos dados reais observados na rede de distribuição (Gao, 2017). Sem a calibração adequada, as simulações podem não refletir corretamente a realidade operacional, resultando em decisões imprecisas (Gao, 2017). A Figura 2, apresenta modelo de calibração hidráulica.

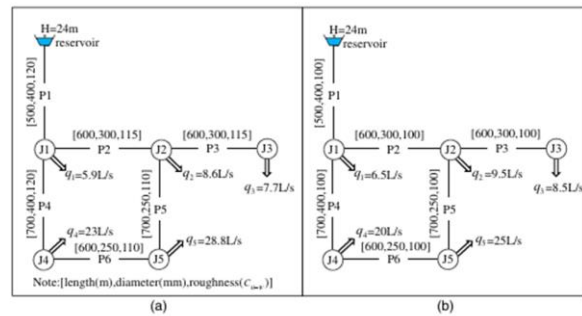
FIGURA 2 - CALIBRAÇÃO DE MODELO HIDRÁULICO.

Table 1. Comparisons of node demands between real values and calibration results

Node identifier	Node demand (L/s)			Node pressure (m)		
	Actual value	Calibration value	Relative error (%)	Actual value	Calibration value	Relative error (%)
J1	5.9	6.9	16.94	23.5	23.4	-0.42
J2	8.6	10.1	17.44	23.0	23.0	0
J3	7.7	9.0	16.88	23.0	23.0	0
J4	23.0	21.3	-7.39	23.2	23.2	0
J5	28.8	26.6	-7.64	22.8	22.7	0.44

Table 2. Comparison of pipe flows between real values and calibration results

Pipe identifier	C-factor			Pipe discharge (L/s)		
	Actual value	Calibration value	Relative error (%)	Actual value	Calibration value	Relative error (%)
P1	120	114	-5.00	74.0	74.0	0
P2	115	120	4.35	27.9	29.1	4.30
P3	115	120	4.35	7.7	9.0	16.88
P4	120	114	-5.00	40.2	38.0	-5.47
P5	110	118	7.27	11.6	9.9	-14.66
P6	110	118	7.27	17.2	16.7	-2.91



Fonte: (Zhang; Zheng; Duan, 2018). João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

Os principais parâmetros a serem calibrados incluem coeficientes de rugosidade, que afetam a perda de carga nas tubulações; curvas de desempenho das bombas, que influenciam o comportamento das bombas na rede; características das válvulas, incluindo as curvas de operação e os coeficientes de perda; e demanda de água, que reflete a quantidade consumida em diferentes partes da rede.

Para calibrar a rede de tubulações, a modelagem no EPANET é utilizada para ajustar o coeficiente de rugosidade com base na idade das tubulações. O processo envolve a comparação dos resultados da simulação com observações reais para validar o modelo. O EPANET simula o comportamento hidráulico e a perda de energia nas tubulações, e a correlação entre os dados simulados e observados reforça a eficácia do modelo calibrado (Limbong; Suripin; Sudarnoutaomo, 2022).

Para realizar a calibração, diversas técnicas podem ser empregadas. O ajuste manual dos parâmetros é feito com base na comparação entre simulações e dados reais. Métodos de otimização ajustam os parâmetros para minimizar as discrepâncias entre valores simulados e medidos (Limbong; Suripin; Sudarnoutaomo, 2022). A análise matemática e estatística é utilizada para identificar e ajustar os parâmetros que causam maiores diferenças, e dados de monitoramento contínuo da rede permitem ajustes periódicos.

O método numérico matemático dos mínimos quadrados e fórmulas iterativas são ferramentas de calibração de modelos hidráulicos de sistemas de distribuição de água. A calibração em parâmetros hidráulicos, como os coeficientes de rugosidade de tubos e as demandas nodais, melhora a eficiência e precisão da calibração. A calibração desses parâmetros é essencial para garantir que os valores simulados pelo modelo correspondam à operação (Zhang; Zheng; Duan et al., 2018).

Os Algoritmos Genéticos (AG) são ferramentas eficazes para a otimização de redes de distribuição de água, uma vez que resolvem problemas complexos e não lineares associados ao design e operação desses sistemas. Eles são valorizados por encontrar soluções próximas do ideal em grandes espaços de busca, melhorando a eficiência e reduzindo custos na gestão de recursos hídricos. A flexibilidade dos AGs permite a adaptação a diversos cenários, tornando-os ferramentas valiosas para planejadores e gestores (Parvaze; Kumar; Khan et al., 2023).

Os AGs podem ser aplicados na calibração de modelos de sistemas de abastecimento de água, ajustando condições reais de operação. Eles são utilizados para ajuste do coeficiente de rugosidade dos tubos e consumo base nos nós, como também configurar as válvulas com base em dados medidos, alinhando dados simulados com dados observados e minimizando discrepâncias (Pordal, A.; Noshadi, M.; Masoudi, 2023) (Shiu; Chung; Chiang, 2023).

O método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP) é empregado para calibrar a rugosidade e ajustar as perdas de carga em sistemas de abastecimento de água. O WLS minimiza a soma dos quadrados das diferenças entre valores simulados e medidos, proporcionando uma avaliação precisa das estimativas. Pode ser combinado com AG e Decomposição de Valor Singular (DVS) para a calibração da demanda de água, oferecendo uma abordagem eficaz para a otimização e operação do sistema (Gao, 2017).

Para calibrar modelos de SAA, utilizam-se técnicas de otimização global, como Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy (CMA-ES), Shuffled Complex Evolution (SCE) e Gauss-Levenberg-Marquardt Algorithm (GLMA). Essas técnicas aplicam algoritmos evolucionários, métodos de evolução complexa e técnicas de ajuste não-lineares, respectivamente, para calibrar a rede hidráulica. Esses métodos ajustam os parâmetros do modelo para minimizar a diferença entre os valores

observados e os simulados, garantindo maior precisão na simulação da rede hidráulica (Hossain; Hewa; Chow et al., 2021).

Uma abordagem eficiente para a calibração e operação das Válvulas Redutoras de Pressão (VRPs) utiliza funções não suaves expressas como soluções de Programas Quadráticos (PQ). Esta técnica não depende de parâmetros específicos, permitindo um gerenciamento mais eficaz da pressão e a otimização da demanda de água. (Dai, 2021).

Para calibrar a rede de tubulação a otimização não linear é útil para minimizar os erros de medições de fluxo e pressão. Essa ferramenta matemática auxilia na operação eficiente do sistema, pois leva em consideração o desgaste natural e o acúmulo de partículas nas paredes dos tubos ao longo do tempo, que são fatores que interferem no funcionamento adequado da tubulação (Santos; Estrada; Puig, 2020).

Para estimar e calibrar a rugosidade em canais de água pode se utilizar as técnicas de Redes Neurais Artificiais (RNA) e Programação Genética (PG), captando a relação entre variáveis de entrada e saída e melhorando a precisão das estimativas (Niazkar; Talebbeydokhti; Afzali, 2018).

A modelagem hidráulica é essencial para entender e otimizar a operação SAA, simulando o comportamento da água em redes complexas. A calibração, por sua vez, é crucial para garantir que essas simulações reflitam com precisão a realidade operacional da rede. Somente com um modelo calibrado é possível validar e ajustar os parâmetros de forma eficaz, permitindo a otimização das operações, a melhoria na distribuição de água e a garantia de um sistema de abastecimento eficiente e seguro. Assim, a combinação de uma modelagem precisa com uma calibração rigorosa assegura a eficácia na gestão e operação das redes de distribuição de água.

3.6 ALGORITMOS EVOLUTIVOS

Os Algoritmos Evolutivos (EAs) oferecem uma abordagem eficaz para a otimização de recursos hídricos, sendo amplamente aplicados em engenharia, estratégias de gestão e calibração de modelos (Parvaze; Kumar; Khan *et al.*, 2023).

A calibração da rede é uma técnica para selecionar os valores dos parâmetros desconhecidos. Também é um processo de otimização onde a diferença entre o

conjunto de valores observados e modelados é minimizada (Shiu; Chung; Chiang, 2023).

Essas técnicas de busca aleatória, baseadas em populações e guiadas por heurísticas, começam com uma população inicial de indivíduos, cada um representando um ponto de busca no espaço das soluções viáveis.

Os Algoritmos Evolutivos (EAs) oferecem uma abordagem eficaz para a otimização de recursos hídricos, sendo amplamente aplicados em engenharia, estratégias de gestão e calibração de modelos. Essas técnicas de busca aleatória, baseadas em populações e guiadas por heurísticas, começam com uma população inicial de indivíduos, cada um representando um ponto de busca no espaço das soluções viáveis. Após a definição da população inicial, o algoritmo evolui por meio de um ciclo iterativo de seleção, recombinação e mutação (Parvaze; Kumar; Khan *et al.*, 2023).

A cada geração, os indivíduos passam por um processo de seleção, recombinação e mutação, com o objetivo de evoluir em direção a regiões mais favoráveis do espaço de soluções. O progresso na busca é feito avaliando-se o fitness de todos os indivíduos, selecionando-se os mais aptos e combinando-os para gerar novos indivíduos com maior probabilidade de melhorar seu fitness. Ao longo de várias gerações, o algoritmo converge para uma solução ótima ou quase ótima, representada pelo melhor indivíduo da população. A estrutura básica dos AEs segue um padrão semelhante, independentemente da variante específica do algoritmo, como Algoritmo Genético (AG), Evolução Diferencial (ED) ou Estratégias Evolutivas (EE) (Janga; Nagesh, 2020).

Esse processo básico envolve seis etapas principais: 1) Inicialização da População: Uma população inicial de soluções é gerada aleatoriamente ou com base em algum critério de inicialização. 2) Avaliação do Fitness: Cada indivíduo é avaliado quanto à qualidade da solução que representa, por meio de uma função de fitness. 3) Seleção: Indivíduos com melhor desempenho têm mais chances de serem selecionados para reproduzir e gerar a próxima geração. 4) Recombinação (Cruzamento): Os indivíduos selecionados são combinados para criar novos indivíduos, geralmente por meio de operações de cruzamento. 5) Mutação: Algumas soluções sofrem alterações aleatórias para introduzir diversidade na população. 6) Substituição: A população é atualizada com a nova geração, e o processo é repetido

até que um critério de parada seja atendido. Com esse ciclo de avaliação, seleção, recombinação e mutação, o algoritmo busca melhorar as soluções ao longo das gerações e se aproximar de uma solução ótima ou quase ótima (Janga; Nagesh, 2020).

3.6.1 ESTRATÉGIAS EVOLUTIVAS

As Estratégias Evolutivas (ES) são um tipo de algoritmo que imita o comportamento adaptativo da evolução natural. Elas usam variáveis reais para resolver problemas de otimização, ou seja, para encontrar a melhor solução possível para um problema. Cada indivíduo em uma estratégia evolutiva pode ser visto como uma tentativa de solução, e essas soluções são melhoradas por meio de ajustes chamados mutações. A mutação ocorre quando um valor é modificado adicionando uma quantidade aleatória (um "ruído" gaussiano) à solução atual. O novo valor gerado é comparado com o anterior, e a melhor solução é escolhida para seguir para a próxima fase de evolução. Esse processo é repetido até que uma solução seja encontrada, conforme o critério estabelecido.

Em um tipo básico de estratégia evolutiva, conhecido como "(1+1) ES", existe apenas um único "indivíduo" (solução), que passa por mutações e é avaliado a cada passo. Mas também existem versões mais complexas, como as estratégias " $(\mu+\lambda)$ " e " (μ, λ) ", que trabalham com grupos de soluções. O parâmetro μ representa o número de indivíduos na população de pais, ou seja, as soluções atuais que geram novos descendentes, enquanto λ indica o número de descendentes gerados a partir da população de pais (Janga; Nagesh, 2020).

No modelo $(\mu + \lambda)$ ES, a próxima geração é formada pelos melhores indivíduos escolhidos entre os μ pais e os λ descendentes, permitindo que pais e descendentes compitam para permanecer na população, o que garante que boas soluções sejam mantidas ao longo do tempo (mecanismo elitista). Já no (μ, λ) , os descendentes são gerados, mas apenas os melhores entre eles seguem para a próxima geração, sem considerar os pais. Isso permite que a busca por soluções seja feita de forma mais eficiente, garantindo um processo contínuo de melhoria (Janga; Nagesh, 2020).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção descreve os materiais e métodos empregados neste estudo. Ela segue uma estrutura que abrange desde o tipo de pesquisa e a caracterização do local de estudo até a análise dos dados. Além disso, detalha a modelagem hidráulica, as etapas da metodologia de eficiência energética e o processo de calibração dos setores do SAA industrial apresentados no trabalho.

4.1 TIPOS DE ESTUDO

O estudo apresentado consiste em pesquisa operacional e de abordagem quantitativa. O estudo operacional trata-se de uma ciência de tomada de decisão que procura determinar como melhor projetar, planejar e operar sistemas por meio de métodos e técnicas de solução (Arenales; Armentano; Morabito *et al.*, 2015). A abordagem quantitativa é utilizada em problemas relacionados a projeto, construção, planejamento, operação e análise de sistemas e processos, frequentemente sob condições que demandam a alocação eficiente de recursos limitados (Cauchick, 2019).

Diante do exposto, a aplicação do estudo operacional com abordagem quantitativa é apropriada para a otimização do SAA industrial em operação. O estudo faz uso de simulações com ferramentas hidráulicas, análise do balanço hidroenergético e implementação de inversores de frequência para a redução do custo operacional do sistema de bombeamento de água.

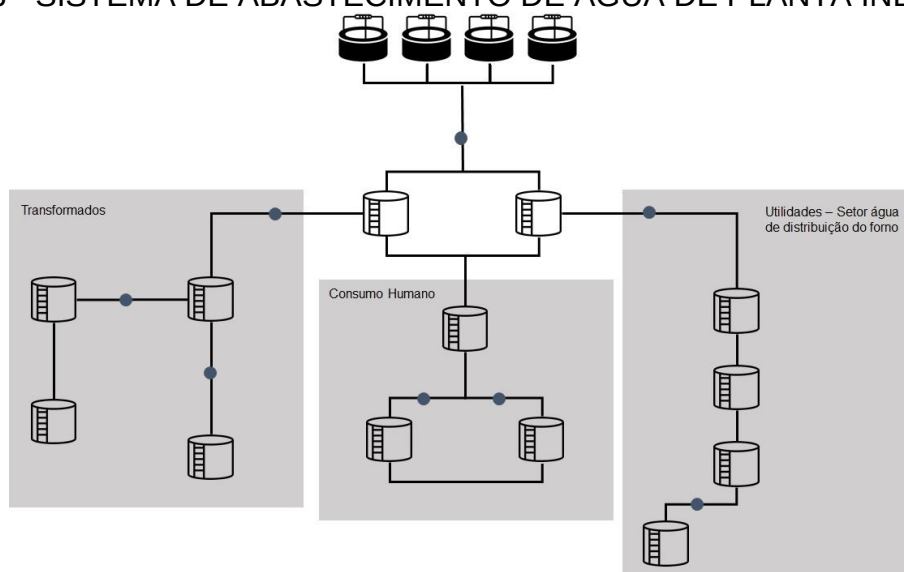
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DO LOCAL DE ESTUDO

O estudo foi realizado na fábrica de vidros, localizada na cidade de Goiania, no estado de Pernambuco. O fábrica funciona 24 horas por dia e sete dias por semana, no beneficiamento da matéria prima e fabricação dos espelhos. O cenário estudado é um SAA independente da companhia de distribuição de água do estado de Pernambuco. A água e a areia são os principais insumos necessários para a fabricação do vidro. Além disso, a água desempenha um papel essencial em várias

etapas do processo de tratamento que antecedem a produção do vidro, garantindo que o produto final esteja pronto para o consumidor final.

Para atender à demanda de água, a planta industrial conta com um reservatório de manancial subterrâneo, um sistema de bombeamento para captação de água dos poços artesianos e uma Estação de Tratamento de Água (ETA) própria. Além disso, possui outros sistemas de bombeamento responsáveis pelo transporte de água para os diversos tanques que compõem a rede de distribuição. A planta é organizada em setores, incluindo Transformados, Utilidades e consumo humano. Os pontos de sensoramento que medem as vazões estão representados por círculos azuis, mas não há registro de outras variáveis hidráulicas nesses ou em outros trechos da rede. Neste estudo, serão analisados o sistema de bombeamento de captação dos poços, com foco na eficiência energética, e o trecho da rede de distribuição que abastece o forno de fabricação de vidros, utilizado para a calibração do SAA. Ambos os setores fazem parte da área de Utilidades, conforme ilustrado na Figura 3.

FIGURA 3 - SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DE PLANTA INDUSTRIAL.



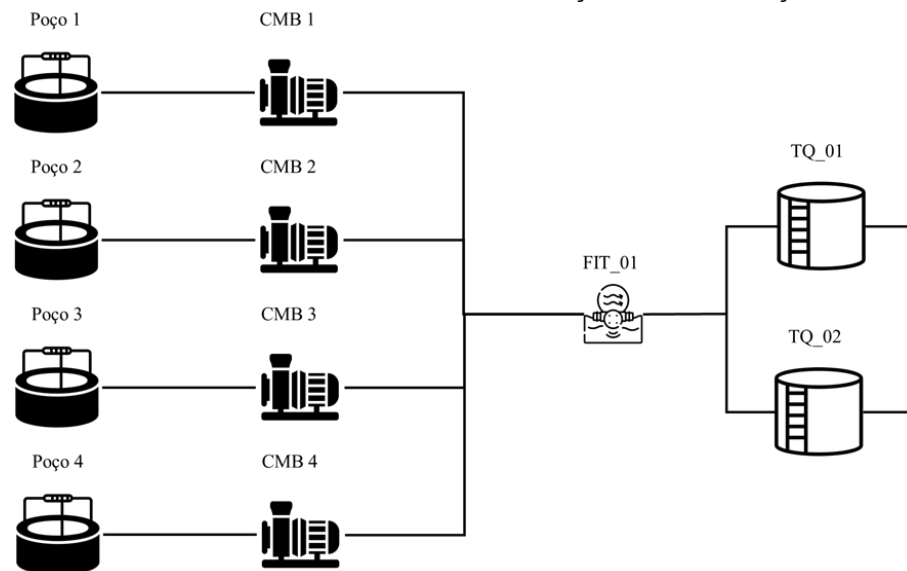
Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

4.2.1 SISTEMA DE BOMBEAMENTO DA ÁGUA DOS POÇOS

O sistema de bombeamento de água dos poços é composto por quatro poços, cada um equipado com seu próprio Conjunto Motor Bomba (CMB). A Figura 4, ilustra

a configuração do sistema de bombeamento de água. Os CMBs possuem características distintas do ponto de vista hidráulico, mecânico e elétrico.

FIGURA 4 - SISTEMA DE CAPTAÇÃO DOS POÇOS.



Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

As bombas na operação do SAA industrial bombeiam água para um conjunto de tanques identificados como TQ_01 e TQ_02. Quando mais de uma bomba é acionada no sistema de captação de água, ocorre um aumento na vazão da tubulação para o sistema de distribuição de água, fazendo com que as bombas operem em paralelo. A medição da vazão na SAA industrial é realizada pelo sensor de vazão FIT_01, que está localizado na tubulação de entrada dos tanques e mede a vazão total de todo o sistema de bombeamento de água.

As bombas do sistema de captação são acionadas conforme as seguintes condições operacionais: 1) cada bomba pode operar no máximo 20 horas por dia e 2) o acionamento deve garantir o atendimento da demanda de água (vazão) da rede de distribuição.

O sistema conta com uma potência elétrica instalada de 112 kW, considerando as quatro bombas em funcionamento, que são acionadas por partida soft start com tensão de alimentação de 380 V trifásica. As características dos quatro poços

artesianos e dos CMBs que formam o reservatório da SAA industrial estão apresentadas, respectivamente na Tabela 1.

TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS DOS POÇOS E BOMBAS.

Características	Poço 1	Poço 2	Poço 3	Poço 4
Profundidade útil (m)	200,54	190	182,4	208,35
Nível dinâmico (m)	144,72	132,12	141,48	150,07
Nível estático (m)	113,9	114,55	110,15	117,7
Conjunto Motor Bomba	CMB 1	CMB 2	CMB 3	CMB 4
Modelo	BHS511-14	BHS516-17	BHSE 635-14	BHS516-21
Potencia mecânica (HP)	15	40	40	55
Potência elétrica (kW)	11,2	29,8	29,8	41
Vazão média (m ³ /h)	16,51	40,61	20,84	46,45
Vazão média (L/ s)	4,59	11,28	5,79	12,90

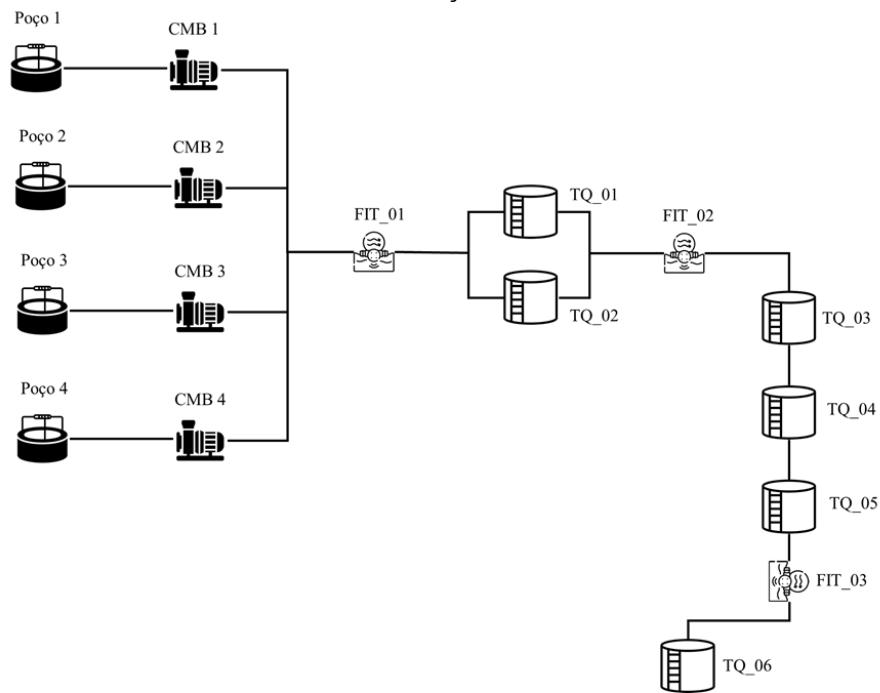
Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

As características dos quatro poços apresentadas na Tabela 1 incluem profundidade, nível dinâmico e nível estático. A operação dos poços é delimitada pelo nível em que a água pode ser retirada, denominado nível dinâmico, enquanto o nível mínimo corresponde ao nível estático. As bombas de cada poço foram caracterizadas com base em suas respectivas potências mecânicas (HP), obtidas nos relatórios de manutenção, e posteriormente convertidas para potência elétrica (kW). A vazão média dos poços, inicialmente expressa em metros cúbicos por hora (m³/h), também foi extraída dos relatórios de manutenção e convertida para litros por segundo (L/s) a fim de viabilizar análises posteriores relacionadas às demandas de vazão da fábrica.

4.2.2 SISTEMA DE BOMBEAMENTO DA ÁGUA DO FORNO

o setor de água industrial da fábrica de vidros envolve o trecho que transporta a água do sistema de captação de bombeamento dos poços até o tanque TQ_06, responsável por resfriar o forno da fabricação de vidros. esse trecho inclui os tanques TQ_03, TQ_04 e TQ_05, que são comunicantes, além dos sensores de vazão FIT_02 e FIT_03, que medem o fluxo na entrada dos tanques comunicantes e na entrada do TQ_06, respectivamente, como apresenta a FIGURA 5.

FIGURA 5 - SISTEMA DE CAPTAÇÃO DO SETOR DE UTILIDADES.



Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

O sistema de bombeamento de água do forno é composto por sete bombas, cuja potência elétrica total supera 60 kW. O acionamento dessas bombas ocorre conforme as condições operacionais, levando em conta os níveis máximo e mínimo dos tanques. As características dos tanques que compõem o reservatório da SAA industrial, bem como a região de operação das bombas em função do nível, estão apresentadas na Tabela 2.

TABELA 2 - CARACTERÍSTICAS DOS TANQUES.

Características	TQ_01	TQ_02	TQ_03	TQ_04	TQ_05
Volume (m³)	30	30	800	970	1435
Nível mínimo (%)	20	20	80	98	95
Nível máximo (%)	95	95	100	100	100

Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

4.3 ANÁLISE DOS DADOS

Os dados apresentados nesta seção correspondem às medições de vazão dos sensores FIT_01, FIT_02 e FIT_03. Esses dados foram utilizados na modelagem

hidráulica no EPANET para definir os cronogramas de operação das bombas, aplicando princípios de eficiência energética nos poços, e na modelagem hidráulica do setor de água do forno para calibração. A Figura 6 apresenta os passos para a consolidação dos perfis de consumo, que se iniciou com a obtenção dos dados de vazão do SAA da fábrica, seguida pela construção e validação do banco de dados.

FIGURA 6 - METODOLOGIA DE ANÁLISE PARA LEVANTAR HISTÓRICO DE CONSUMO.

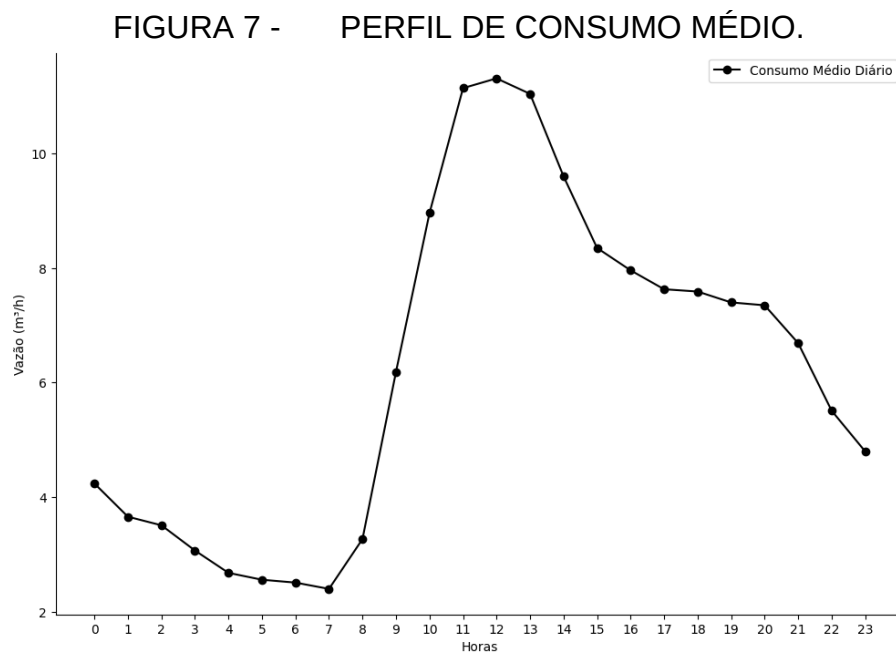


Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

Os dados de vazão do setor de análise foram disponibilizados pela fábrica, abrangendo o período de medição de janeiro a abril de 2024, e foram obtidos dos sensores FIT_01, FIT_02 e FIT_03, conforme apresentado nas seções 4.2.1 e 4.2.2. Os dados foram fornecidos em arquivos no formato .csv, com cada sensor registrando amostras a cada segundo, sendo a vazão medida em m^3/h . Esses dados compõem o banco de dados de análise deste estudo.

Para a análise dos dados da fábrica, utilizou-se o Visual Studio Code (VSCode) com a extensão Python (versão 3.10.9). O software foi empregado no pré-tratamento dos dados, incluindo a análise de outliers e dados faltantes. Posteriormente, as medições de vazão (m^3/h a cada segundo) foram reamostradas para intervalos de 5 minutos, reduzindo a quantidade de dados de 86.400 para 1.440 linhas diárias. Esse processo tornou o processamento e a manipulação das informações mais ágeis e eficientes, além de minimizar o impacto de variações momentâneas e ruídos, permitindo uma análise estatística mais robusta e a identificação de padrões de consumo com maior precisão. Apesar da redução de amostras, a reamostragem preservou o comportamento das vazões da fábrica, garantindo a representatividade dos dados.

A partir do tratamento e consolidação dos dados, foram obtidos os perfis de consumo de água em escalas mensais, semanais e diárias, com o objetivo de identificar padrões de consumo. Para a definição desses padrões nos sensores FIT_01, FIT_02 e FIT_03 no EPANET, foram considerados os perfis que apresentavam o maior valor da soma das vazões médias horárias ao longo de 24 horas. Os perfis obtidos a partir dos arquivos de medição dos sensores foram então utilizados na modelagem no EPANET, abrangendo o setor de captação de água dos poços, a rede de distribuição de água dos poços e o setor de distribuição de água do forno. Além disso, esses perfis possibilitaram uma análise detalhada dos períodos de maior e menor demanda, conforme ilustrado na Figura 7, que apresenta um perfil genérico levantado para um período de 24 horas.



Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

O perfil do FIT_01 com o critério apresentado no parágrafo anterior foi utilizado para obter os perfis de consumo mensal e diário apresentados na seção 5.1, como também para estabelecer cronograma de ativação das bombas utilizando o controle programado do EPANET e a implementação dos inversores de frequência ao utilizar os padrões de velocidade das bombas apresentados na seção 5.2.

Os perfis dos sensores FIT_02 e FIT_03 foram utilizados para representar o consumo do setor de água do forno nos nós de consumo N02 e N03 durante um período de 24 horas, seguindo o mesmo critério do FIT_01. Esses consumos horários foram aplicados na modelagem hidráulica do setor para a obtenção dos parâmetros de vazão, pressão e perda de carga, apresentados na seção 5.3.1. Além disso, foram integrados ao algoritmo de Estratégias Evolutivas para a calibração dos dados de vazão e a obtenção dos resultados de pressão e perda de carga, conforme descrito na seção 5.3.2.

4.4 MODELAGEM HIDRÁULICA

A modelagem hidráulica foi realizada no EPANET, utilizando dados detalhados da rede da planta industrial, incluindo diâmetro, rugosidade, material e comprimento das tubulações. As curvas das bombas foram incorporadas ao modelo com base nos dados de vazão e carga fornecidos pelos manuais dos fabricantes. Além disso, foram definidos três padrões fundamentais para a simulação: o padrão de consumo da rede de distribuição, seguindo a curva de consumo do FIT_01; o padrão de custo energético, descrito na Seção 4.5.1; e o padrão de velocidade das bombas, detalhado na Seção 4.5.2.

Foi implementado no EPANET um controle programado que garantiu o cumprimento do limite máximo de 20 horas diárias de operação por bomba. Além disso, o acionamento foi configurado para que apenas uma bomba entrasse em operação por hora, seguindo o perfil de vazão estabelecido e os critérios descritos na Seção 4.3. Essa estratégia foi adotada para evitar o funcionamento simultâneo de múltiplas bombas, uma vez que possuem características distintas e, em operação paralela, o rendimento do sistema de bombeamento poderia ser comprometido. Assim, a adoção da estratégia de evitar o acionamento simultâneo visa manter cada bomba operando dentro da sua faixa de melhor eficiência, reduzindo perdas energéticas e garantindo um melhor desempenho do sistema. Além disso, essa configuração evita esforços mecânicos desnecessários e contribui para a prolongação da vida útil dos equipamentos.

Diante disso, o controle utilizou apenas as bombas B2 e B4, pois são as de maior capacidade de bombeamento, com vazões de 11,28 L/s e 12,9 L/s, respectivamente,

conforme apresentado na Tabela 1 e obtido nos relatórios de manutenção dos poços da fábrica. Essa escolha foi feita para possibilitar a implementação de inversores de frequência nas bombas com maior capacidade de vazão. A estratégia operacional teve como objetivo garantir um funcionamento contínuo ao longo das 24 horas de operação. Para isso, a bomba B2 foi programada para operar das 5h às 16h, enquanto a bomba B4 assumiu o restante do período. Essas análises são detalhadas nas Seções 5.1 e 5.2.

Para realizar a análise descrita na seção 4.5.3, foram conduzidas duas simulações. A primeira considerou os padrões de consumo, os custos de energia e a implementação do controle, com as regras de operação apresentadas na seção 4.2.1. A segunda utilizou os mesmos critérios da primeira, acrescentando a implementação do inversor de frequência, conforme detalhado na Seção 4.5.2. A economia diária foi obtida pela diferença entre os custos diários da segunda simulação e os da primeira. Para a análise anual, os valores diários foram multiplicados por 365, correspondente a um ano.

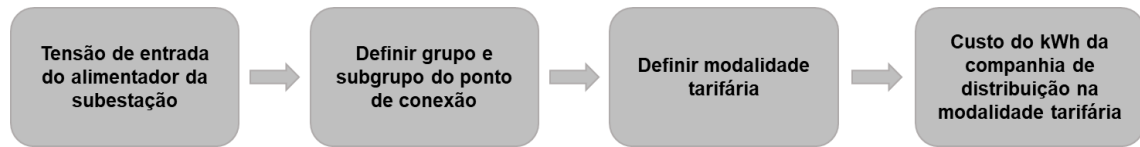
4.5 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Este tópico apresenta as metodologias desenvolvidas para a análise da eficiência energética, abordando a modalidade tarifária considerada, o uso do inversor de frequência e a parametrização da frequência com base no padrão de velocidade da bomba. Além disso, são exploradas as equações de afinidade, que relacionam a velocidade da bomba à vazão, bem como os cálculos financeiros envolvidos na análise de investimentos.

4.5.1 MODALIDADE TARIFÁRIA

A análise tem como finalidade propor a redução do custo da operação do sistema de bombeamento dos poços de forma otimizada de modo que o sistema opere 24 horas com o menor custo energético. Para isso é imprescindível entender quanto é o custo do kWh pago a concessionária de energia. Para definir o custo energético utilizado no estudo foram realizadas as seguintes etapas, apresentadas na Figura 8.

FIGURA 8 - DEFINIÇÃO DO CUSTO ENERGÉTICO POR KWH.



Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

Inicialmente, foi levantada a tensão no alimentador de entrada da subestação, que é de 69 kV. A partir dessa informação, foram buscados os dados sobre o grupo e subgrupo da unidade consumidora para definir a modalidade tarifária, em que a fábrica de vidros se classifica, segundo a Resolução Normativa ANEEL nº 1000/2021 e o Módulo 7 dos Procedimentos de Regulação Tarifária (PRORET), o artigo 220, parágrafo primeiro, apresenta a modalidade tarifária azul para pontos de conexão com tensão maior ou igual a 69 kV, classificando-os no grupo A e subgrupo A3. Com a definição do grupo, subgrupo e modalidade tarifária, foram obtidos os valores do kW das tarifas de energia elétrica nos horários de ponta e fora de ponta da concessionária de distribuição de energia do Estado de Pernambuco, a Neoenergia PE (Neoenergia PE, 2024). Esses valores estão apresentados na Tabela 3.

TABELA 3 - CUSTO ENERGÉTICO DA NEOENERGIA PE.

A3	TUSD (R\$/ kWh)	TUSD (R\$/KWh)	TE (R\$/ kWh)	TARIFA
Consumo Ativo na Ponta		0,047	0,531	0,578
Consumo Ativo Fora Ponta		0,047	0,32	0,367
Consumo Reativo Excedente			0,339	0,339
Demanda Ativa na Ponta	7,85			7,85
Demanda Fora Ponta	7,7			7,7
Demanda Reativa Excedente na Ponta e Fora Ponta	7,7			7,7
Ultrapassagem na ponta	15,7			15,7
Ultrapassagem fora ponta	15,4			15,4

Fonte: Adaptada de Neoenergia PE. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

Para o estudo do custo energético foram considerados apenas o consumo ativo e a demanda na ponta e fora ponta. A concessionária Neoenergia PE considera o consumo na ponta os horários entre 17h30min e 20h30min e fora ponta o consumo fora desse período. Não foram considerados os valores de reativos, pois não se tem a informação desses dados elétricos, como também dos valores de ultrapassagem.

A compreensão da modalidade tarifária foi fundamental para o levantamento do padrão de preços e o cálculo das potências ativas e demandas advindas da

modalidade tarifária apresentada na Tabela 3 e utilizadas no padrão de preços na modelagem no EPANET.

4.5.2 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

O inversor de frequência é um dispositivo eletrônico que regula a velocidade de rotação do motor de uma bomba, controlando a frequência da corrente elétrica fornecida ao motor. Em sistemas de bombeamento de água, ele desempenha um papel crucial na otimização do desempenho e na melhoria da eficiência energética, permitindo que a bomba opere de acordo com a vazão necessária para atender à demanda.

O inversor ajusta a frequência da corrente elétrica, o que, por sua vez, altera a rotação do motor e o desempenho da bomba. Isso ocorre porque há uma relação direta entre a frequência da corrente e a rotação do motor: ao diminuir a frequência, a rotação reduz; ao aumentá-la, a rotação cresce. Esse controle permite que o sistema de bombeamento se ajuste dinamicamente às variações de demanda, alterando a velocidade da bomba em tempo real.

A simulação do inversor de frequência definida no padrão do EPANET foi obtida por meio das equações de afinidade, que descrevem a relação entre a velocidade da bomba e a vazão (Heber, 2019), conforme apresentado na Equação 1.

$$N_2 = N_1 \frac{Q_2}{Q_1} \quad (1)$$

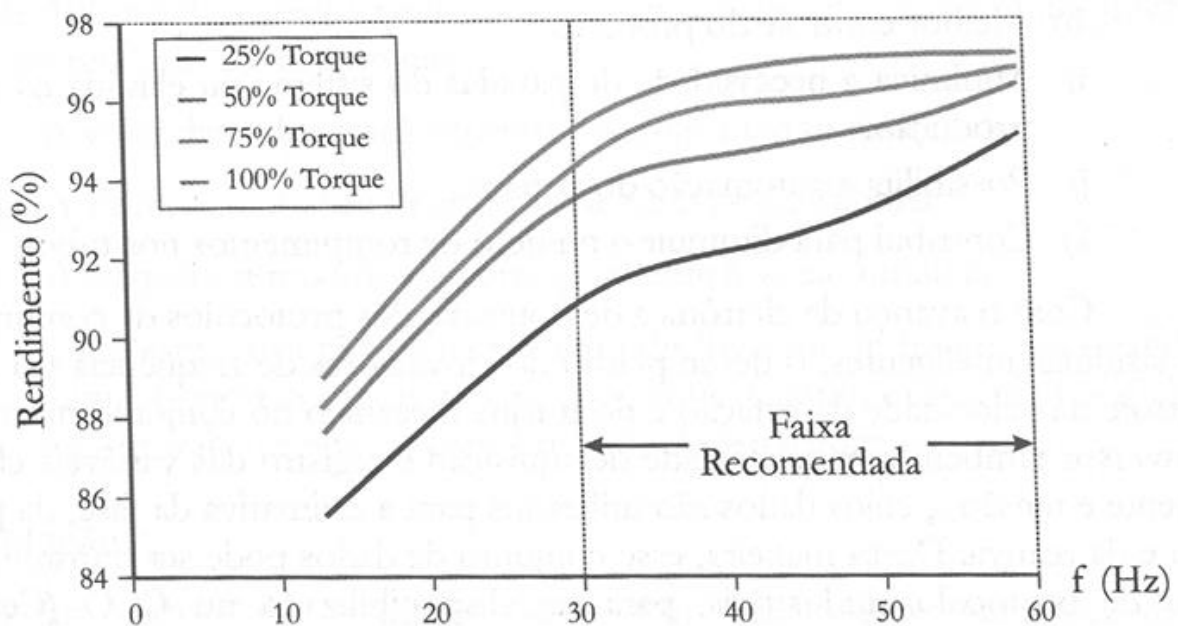
Em que N_2 é a rotação que se deseja, Q_2 é a vazão desejada, Q_1 é a vazão em m^3/h ajustada pela curva da bomba, considerando uma altura manométrica H e N_1 é a rotação do motor síncrono. A rotação N_2 estará relacionada a uma frequência e ao número de polos da máquina síncrona, conforme apresenta a Equação 2.

$$N_{si} = \frac{120f}{p} \quad (2)$$

Em que N_{si} é rotação síncrona, p é o número de polos da máquina elétrica e f é a frequência da rede, que para o estudo foi utilizado 60 Hz.

A velocidade da bomba foi estimada para as bombas de análise utilizando a equação de afinidade, conforme apresentada na Equação 1. Para avaliar se a faixa de frequência necessária para atender à demanda de água estava dentro dos parâmetros recomendados pela literatura, conforme Heber (2019), foi aplicada a Equação 2. A Figura 9 ilustra a curva de operação recomendada para motores acionados por inversores de frequência.

FIGURA 9 - CURVA DE OPERAÇÃO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA.



Fonte: Retirado do Livro Sistema de Abastecimento (Heber, 2019). Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

4.5.3 ANÁLISE ECONÔMICA

A análise econômico-financeira deste trabalho será baseada no investimento em dois inversores de frequência: um para a bomba B2, com potência de 40 CV, e outro para a bomba B4, com potência de 60 CV, que são as bombas com maior capacidade de bombeamento.

Para esta análise, foram cotados dois modelos de inversores da WEG, fabricante e fornecedora dos equipamentos: o CFW500F77P0T4 para a bomba B2 (40 CV) e o CFW500F0105T4 para a bomba B4 (55 CV). O custo total dos inversores foi de R\$

37.260,00, foram adquiridos em uma loja eletrônica especializada. Além disso, foram cotados dois quadros elétricos, um para cada inversor, com as devidas proteções, ao custo de R\$ 30.000,00, fornecidos por uma empresa especializada em montagem e manutenção de quadros elétricos. Assim, o investimento total foi de R\$ 67.260,00.

Com base nesse investimento, serão calculados o Payback, a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Valor Presente Líquido (VPL) do projeto.

O payback é um indicador que calcula o tempo necessário para que o investimento inicial seja recuperado por meio dos fluxos de caixa gerados pelo projeto. Em outras palavras, ele indica em quanto tempo o dinheiro investido será "pago" pelos lucros ou economias que o projeto gera. O Payback é calculado conforme a Equação 3.

$$PayBack = t \text{ quando } \sum_{i=1}^t FC_t \geq Investimento \text{ Inicial} \quad (3)$$

Em que o FC_t é o fluxo de caixa no período de análise e t é o tempo de retorno do investimento, quando o Fluxo de caixa é igual ou maior do que o investimento.

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é a taxa de desconto que representa a rentabilidade do investimento, ou seja, a taxa de retorno que o projeto oferece. Se a TIR for maior do que a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), o projeto é considerado viável, pois o retorno supera o custo do capital. O cálculo do TIR é apresentado na Equação 4.

$$\sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1+r)^t} = 0 \quad (4)$$

Em que o FC_t é o fluxo de caixa no período de análise e t é o período, n a vida útil do projeto e r é o TIR.

O Valor Presente Líquido (VPL) é o valor atual dos fluxos de caixa futuros de um projeto, descontados por uma taxa de desconto. Se o VPL for positivo, o projeto é viável, pois indica que os fluxos de caixa gerados serão suficientes para cobrir o investimento e ainda gerar lucro. Se for negativo, o projeto não é rentável e deve ser reconsiderado. O VPL é calculado como apresenta a Equação 5.

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} - I \quad (5)$$

Em que o FC_t é o fluxo de caixa no período de análise e t é período, i é a TMA, n vida útil do projeto e I é o investimento inicial.

4.6 MODELAGEM E CALIBRAÇÃO DO SETOR ÁGUA DISTRIBUIÇÃO DO FORNO

Este tópico apresenta os métodos desenvolvidos para o setor de distribuição de água do forno, incluindo a modelagem do sistema no EPANET, a integração com a biblioteca WNTR em Python e a calibração do modelo por meio do algoritmo de Estratégias Evolutivas.

4.6.1 MODELAGEM DO SETOR ÁGUA DISTRIBUIÇÃO DO FORNO

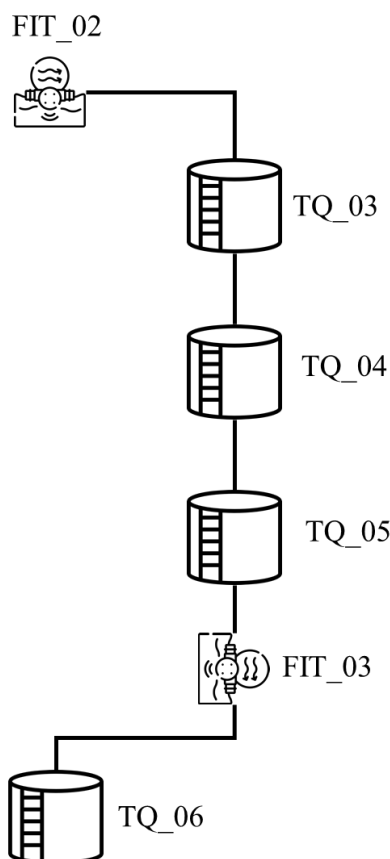
A fábrica de vidros apresenta carência de pontos hidráulicos de medição, apenas pontos de vazão, o que dificulta a calibração da rede, pois a calibração exige que os dados simulados correspondam aos dados reais de operação. Como não temos esses dados, faz-se necessário utilizar estimativas. Para fazer estimativas e entender o comportamento da rede, foi necessário realizar a modelagem hidráulica do setor água de distribuição do forno.

A modelagem em EPANET foi realizada utilizando as características construtivas do trecho setor de água do forno. Foi considerado para a tubulação o diâmetro, o comprimento, o material da estrutura, e o coeficiente de rugosidade estimado pelo fabricante do material. Foi considerado para os tanques as dimensões, capacidade e nível mínimo e máximo de operação da fábrica, como apresentado na Tabela 2.

Para a modelagem em EPANET foi utilizado Reservatório de Nível fixo (RNF) para representar os poços, os pontos de consumo foram identificados pelos nós FIT_02 e FIT_03, os demais nós, foram definidos como nós de junção, as bombas consideradas foram modeladas conforme a operação no sistema de distribuição de água da fábrica, e os tanques comunicantes foram representados por um único Reservatório de Nível Variado (RNV). As tubulações T2 e T3 foram analisadas no

processo de calibração na atualização do fator de rugosidade das tubulações, conforme apresenta a Figura 10.

FIGURA 10 - MODELAGEM SETOR DE DISTRIBUIÇÃO ÁGUA DO FORNO.



Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

Para implementar o padrão de consumo na entrada dos tanques comunicantes, mensurado pelo FIT_02, e na entrada do TQ_06, mensurada pelo FIT_03, no EPANET, foram utilizados os dados tratados e validados, conforme apresentado no tópico sobre o banco de dados. Dessa forma, foi possível obter o histórico médio de vazão e o padrão de consumo horário dos sensores FIT_02 e FIT_03, respectivamente.

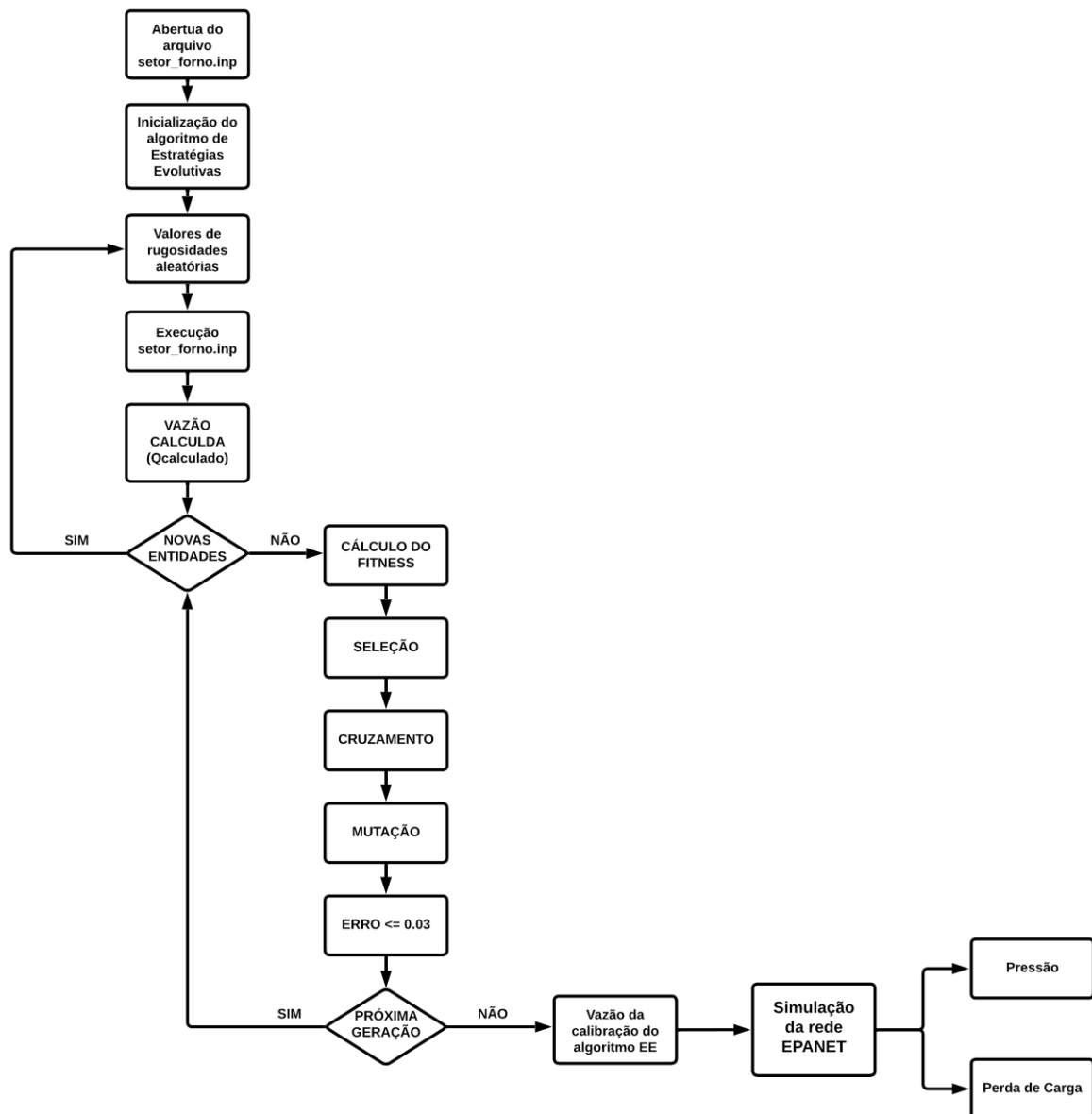
Para estimar as vazões na modelagem hidráulica, utilizou-se a linguagem de programação Python, devido à sua ampla gama de bibliotecas que oferecem ferramentas para a análise de sistemas de distribuição de água. A integração do Python com o EPANET 2.2 foi realizada através da biblioteca Water Network Tool for Resilience (WNTR) (Klise; Hart; Moriarty, 2017). A biblioteca WNTR permite trabalhar

com arquivos desenvolvidos pelo EPANET e desenvolver a análise do SAA. Além disso, ela possibilita o acesso e o ajuste dos parâmetros hidráulicos, conforme a modelagem hidráulica e a operação da rede de distribuição de água.

4.6.2 CALIBRAÇÃO DO SETOR ÁGUA DISTRIBUIÇÃO DO FORNO

Por meio da integração da rede modelada no EPANET com o Python, foi possível implementar o algoritmo de EE para estimar os valores de vazão nos trechos da tubulação. O algoritmo foi inicializado, permitindo a otimização dos parâmetros hidráulicos. A Figura 11 ilustra a implementação do algoritmo, destacando as etapas e os principais componentes envolvidos no processo.

FIGURA 11 - ALGORITMO DE CALIBRAÇÃO DOS DADOS DE VAZÃO.



Fonte: Adaptada de (Shiu; Chung; Chiang, 2023). João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

O processo de calibração do SSA foi iniciado na abertura do arquivo da rede modelada, cuja a extensão utilizada foi a .inp. Após a abertura do arquivo a rede é simulada e armazenada os dados hidráulicos originais do modelo para posteriores análises, em especial o da vazão da fábrica, o $Q_{original}$. A seguir é inicializado o algoritmo EE que definiu inicialmente uma população aleatória, especificando o número de indivíduos e os genes de cada um dos indivíduos de uma população de

rugosidades, o fator C de Hazen-Williams. Para este caso, cada gene corresponde a um trecho da tubulação. A Equação de Hazen-Williams foi utilizada para obter o $Q_{calculado}$. Como apresenta a Equação 6.

$$Q_{calculado} = \left(\frac{hf C^{1.83} D^{4.87}}{10.66 L} \right)^{\frac{1}{1.83}} \quad (6)$$

O $Q_{calculado}$, em m^3/s , é a vazão resultante da substituição do fator C (adimensional) de cada gene de cada indivíduo da população aleatória gerada, considerando também os valores de hf (perda de carga, em metros), L (comprimento da tubulação, em metros) e D (diâmetro da tubulação, em metros). Os valores de L e D correspondem às características reais das tubulações da fábrica e foram extraídos do arquivo .inp gerado pela modelagem no EPANET, com os atributos da biblioteca WNTR. Esses mesmos valores de L e D foram utilizados no cálculo da perda de carga hf, que foi determinada a partir dos resultados da simulação hidráulica no EPANET, utilizando a biblioteca WNTR e considerando a vazão medida da fábrica $Q_{original}$ e um fator C fixo de 140. Todos os parâmetros foram aplicados na Equação 6, e as unidades adotadas seguem o Sistema Internacional de Unidades (SI).

A função objetivo utilizada no algoritmo é apresentada na Equação 7. O parâmetro $Q_{original}$, que representa a vazão da fábrica, foi obtido da rede modelada no arquivo .inp, antes das atualizações decorrentes da geração de rugosidades aleatórias pela população do algoritmo.

$$F(x) = \min \sum_{i=1}^n (Q_{original} - Q_{calculado})^2 \quad (7)$$

A função objetivo proposta busca minimizar a diferença quadrática entre as vazões da fábrica implementadas no modelo hidráulico $Q_{original}$ e as vazões calculadas a partir da atualização da população aleatória gerada $Q_{calculada}$. A escolha de não considerar as diferenças de pressão na função objetivo deve-se à ausência de medidores de pressão na operação real da fábrica, que conta apenas com sensores de vazão.

A expressão da função objetivo *min* indica que os parâmetros do modelo hidráulico estão sendo ajustados para minimizar essa diferença ao longo de todos os pontos $i = 1$ até n , onde n representa o número de trechos percorridos na rede de distribuição de água que tenham valores de rugosidades associadas.

Após a criação da população inicial e a aplicação da função objetivo, o processo de seleção é realizado pelo método do torneio, escolhendo os dois indivíduos com os menores valores de fitness, ou seja, aqueles cuja soma quadrática das diferenças entre as vazões simuladas e observadas é menor. Cada cromossomo da população é representado por um vetor de vazões $x = [Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6, Q_7]$, obtidos da Equação 7 e que foi gerado a partir dos coeficientes aleatórios da população de rugosidade das tubulações $y = [C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7]$, substituídos na Equação 6. A avaliação da aptidão dos cromossomos ocorre por meio da função objetivo, onde menores valores indicam melhor adaptação. A seleção dos mais aptos para reprodução, combinada com a recombinação e a mutação, garante variação genética na população, permitindo a evolução das soluções em busca da otimização.

O cruzamento é realizado pelo método aritmético, no qual dois indivíduos $x(p_1)$ e $x(p_2)$ são combinados por uma média ponderada, gerando um novo indivíduo $x(\text{filho}) = \alpha x(p_1) + (1 - \alpha)x(p_2)$, onde α é um fator aleatório entre 0 e 1, assegurando transições suaves entre soluções. Em seguida, o vetor resultante sofre mutação gaussiana, onde cada gene Q_i é modificado pela adição de um ruído aleatório $N(0, \sigma)$, resultando no vetor mutado $x_i(\text{mutado}) = x_i + N(0, \sigma)$, com σ controlando a intensidade da perturbação. Esse processo iterativo conduz à convergência para uma solução otimizada, garantindo a calibração precisa do modelo hidráulico ao alinhar as vazões simuladas $Q_{\text{calculada}}$ às observadas Q_{original} . O indivíduo com o menor erro entre os valores simulados e medidos representa a solução ótima, resultando em um modelo mais confiável para estimativas indiretas de pressão nos nós e perdas de carga nas tubulações do sistema de abastecimento industrial, com os valores de vazão estimados pelo algoritmo EE.

Para que o algoritmo convergisse para resultados próximos de Q_{original} , foi adotado como critério de parada um erro menor ou igual a 3% entre os valores de Q_{original} e de $Q_{\text{calculada}}$ para cada indivíduo em cada geração. Além disso, foram realizadas simulações para avaliar o número de gerações necessárias para atingir o objetivo, considerando variações no fator C da população aleatória, com intervalos de

110 a 140 e de 130 a 140. A probabilidade de mutação também foi testada para cada caso, com valores de 1%, 3% e 5%.

Foram realizados 6 tipos simulações para verificar em quantas gerações o algoritmo convergia. A Simulação I, Simulação II e Simulação III foram utilizados a taxa de cruzamento de 1%, 3% e 5%, respectivamente e o fator C variando de 100 a 140. Para a Simulação IV, Simulação V e Simulação VI foram utilizados a taxa de cruzamento de 1%, 3% e 5%, respectivamente e o fator C variando de 130 a 140.

5 RESULTADOS

5 RESULTADOS

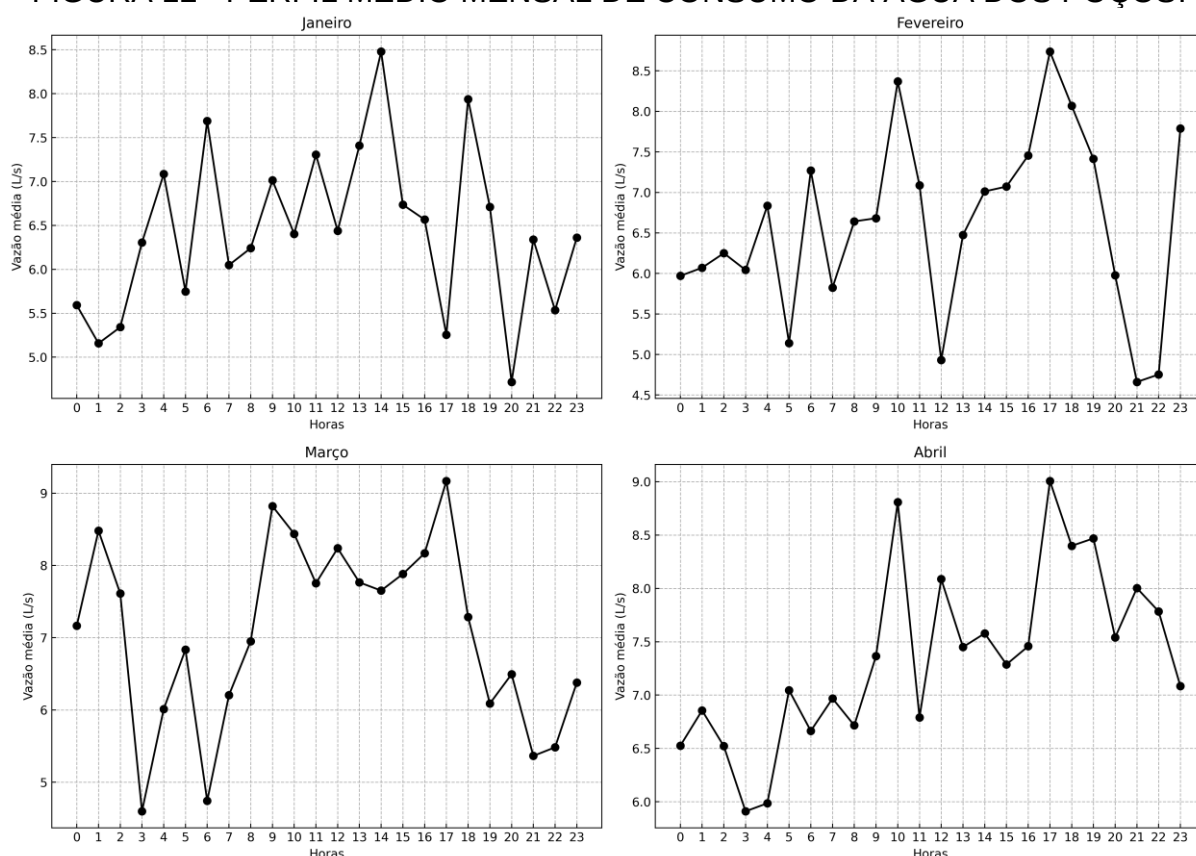
Nesta etapa serão apresentados os resultados obtidos com a metodologia e análises empregadas para responder à questão da pesquisa.

Serão apresentados os dados de vazão da fábrica de vidros, bem como os perfis de consumo utilizados para otimizar o acionamento das bombas, visando a redução dos custos de bombeamento e a melhoria da eficiência hidroenergética em uma planta industrial de operação intermitente. Além disso, serão detalhados a modelagem hidráulica do setor de distribuição de água do forno no EPANET, a proposta de implementação de inversores de frequência e a análise de viabilidade econômica associada. Por fim, será abordada a calibração do modelo hidráulico por meio do algoritmo de Estratégias Evolutivas, uma técnica metaheurística voltada à otimização dos parâmetros do sistema.

5.1 RESULTADOS DOS PERFIS DE VAZÃO

Após a análise dos dados dos sensores de vazão FIT_01, fornecidos pela fábrica e medidos em m^3/h , foi realizado um pré-tratamento para assegurar a qualidade e precisão das informações, incluindo a remoção de outliers, tratamento de dados faltantes e correção de valores não numéricos (NaN). Originalmente registrados a cada 5 segundos, os dados foram reamostrados para intervalos de 5 minutos, permitindo a geração de perfis médios horários para cada dia da semana e a consolidação do histórico médio horário para todo o período. Esta abordagem facilitou a identificação de padrões sazonais e tendências gerais, proporcionando uma visão abrangente do comportamento de consumo e permitindo uma modelagem mais precisa dos sistemas hidráulicos. Os perfis de consumo médio horário para cada dia da semana do sensor FIT_01, que mede o fluxo de água da saída dos poços, ilustrado na Figura 4, e esses perfis ajudam a entender o consumo mensal da água dos poços, conforme detalhado na Figura 12.

FIGURA 12 - PERFIL MÉDIO MENSAL DE CONSUMO DA ÁGUA DOS POÇOS.

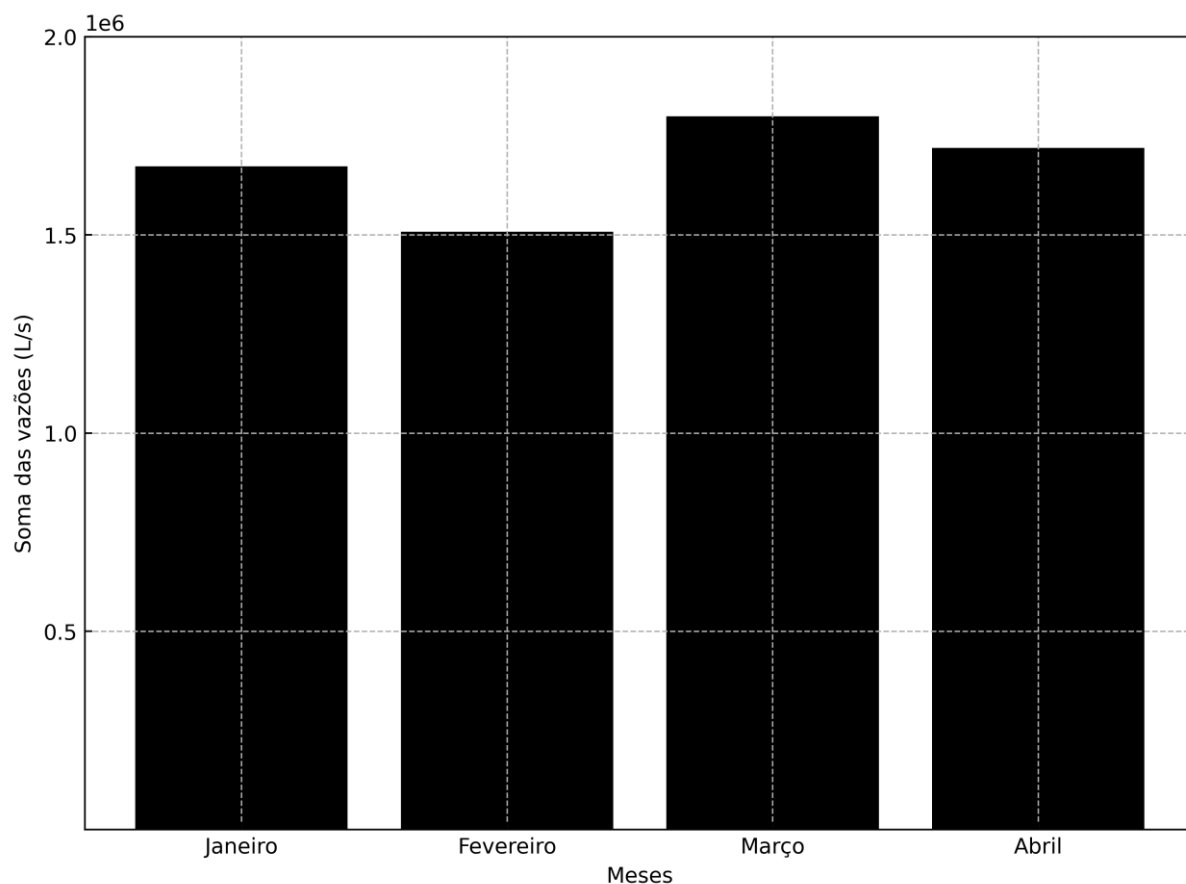


Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

A Figura 12 mostra que os valores máximos de vazão, em L/s, ocorrem nos meses de março e abril, com picos superiores a 9 L/s às 17 horas. Esses meses também registram elevados consumos nos períodos das 9 horas (março) e 10 horas (abril). Por outro lado, o menor consumo em ambos os meses ocorre às 3 horas da manhã. Em fevereiro, o consumo máximo é registrado às 17 horas, seguido pelas 10 horas, enquanto o menor consumo ocorre ao meio-dia, apresentando um perfil distinto dos meses de janeiro, março e abril.

Para compreender qual mês demandou maior consumo foi realizada a soma das vazões de cada mês, essa análise é apresentada na Figura 13.

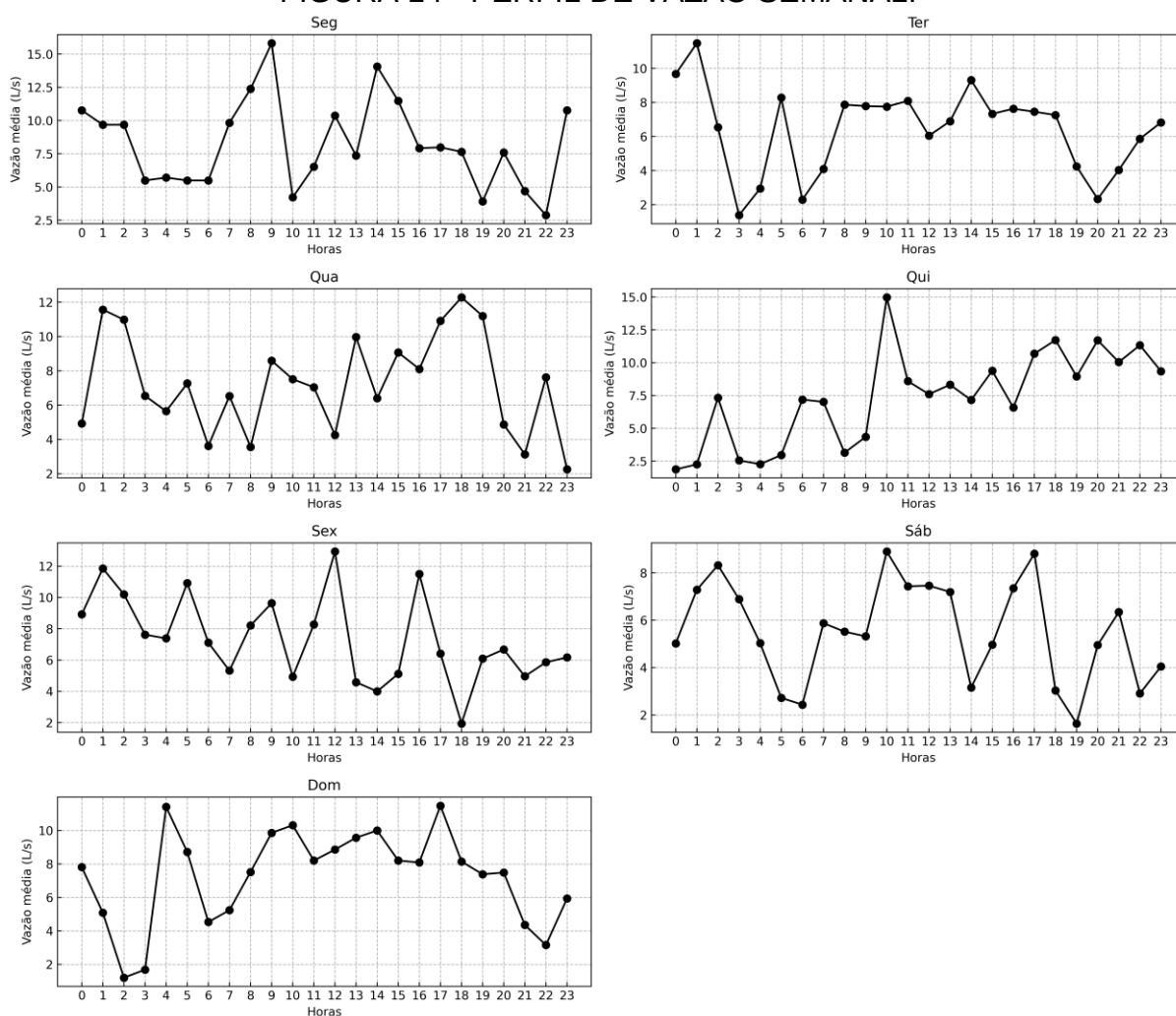
FIGURA 13 - SOMA DAS VAZÕES PARA CADA MÊS.



Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

A Figura 13, demonstra que a maior soma das vazões ocorreu em março, seguido por abril e janeiro, enquanto fevereiro registrou o menor volume bombeado. Essa análise foi essencial para determinar qual cenário mensal seria utilizado como referência para o perfil de consumo na modelagem hidráulica realizada no EPANET. Após identificar o mês com a maior demanda de água, analisou-se o perfil semanal de consumo para março, conforme ilustrado na Figura 14.

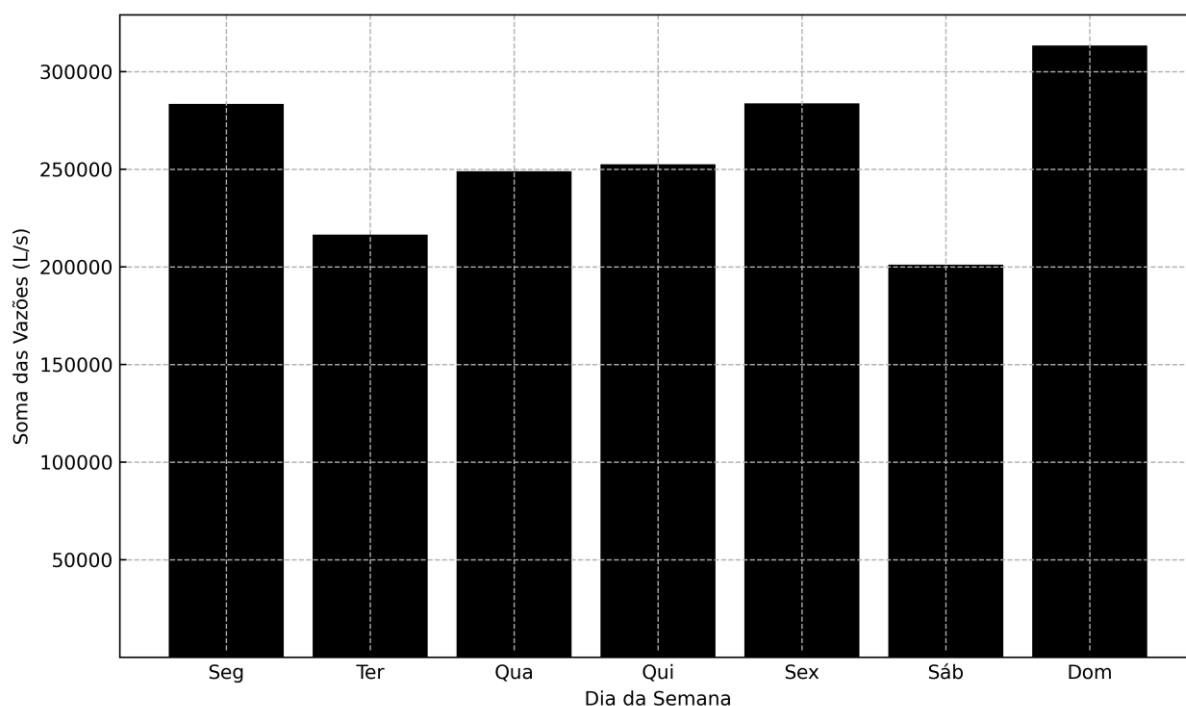
FIGURA 14 - PERFIL DE VAZÃO SEMANAL.



Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

Os perfis apresentados na Figura 14 mostram cenários diversos, sem evidenciar um padrão de consumo uniforme. A maior vazão registrada ultrapassou 15 L/s, ocorrendo na segunda-feira às 9 horas, enquanto as menores vazões, inferiores a 2 L/s, foram observadas na terça-feira, sábado e domingo. Diante da ausência de um padrão definido e com base nos perfis diários, foram calculadas as demandas de água para cada dia da semana, a fim de identificar a maior demanda de vazão registrada durante o período semanal, conforme ilustrado na Figura 15.

FIGURA 15 – SOMA DA VAZÃO POR DIA DA SEMANA.



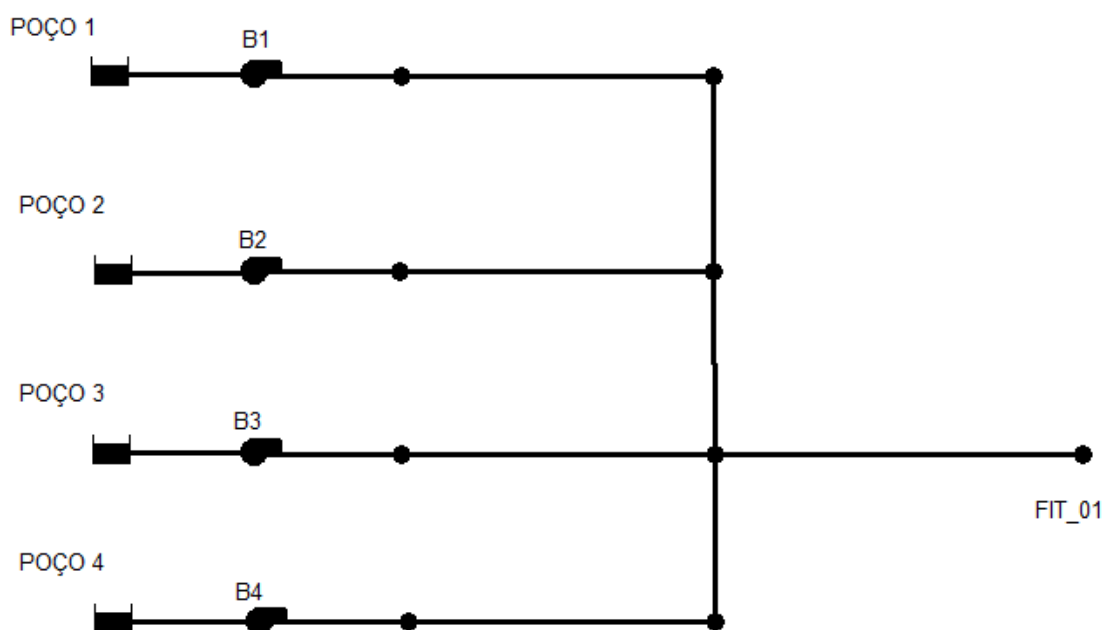
Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

Conforme ilustrado na Figura 15, a maior vazão semanal de água foi registrada em um domingo, seguida pelas demandas de quinta-feira, segunda-feira, quarta-feira, terça-feira e sábado. Com base nessa análise, o cenário correspondente ao domingo foi selecionado para a aplicação do padrão de consumo na modelagem hidráulica, por apresentar maior consumo e aplicar os métodos das seções 4.5.

5.2 MODELAGEM HIDRÁULICA SETOR POÇOS

Com os processos descritos na seção de materiais e métodos, foi realizada a modelagem hidráulica esquematizada conforme esboço da Figura 4. Conforme é apresentada na Figura 16.

FIGURA 16 – MODELAGEM HIDRÁULICA DO SETOR DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA DOS POÇOS.

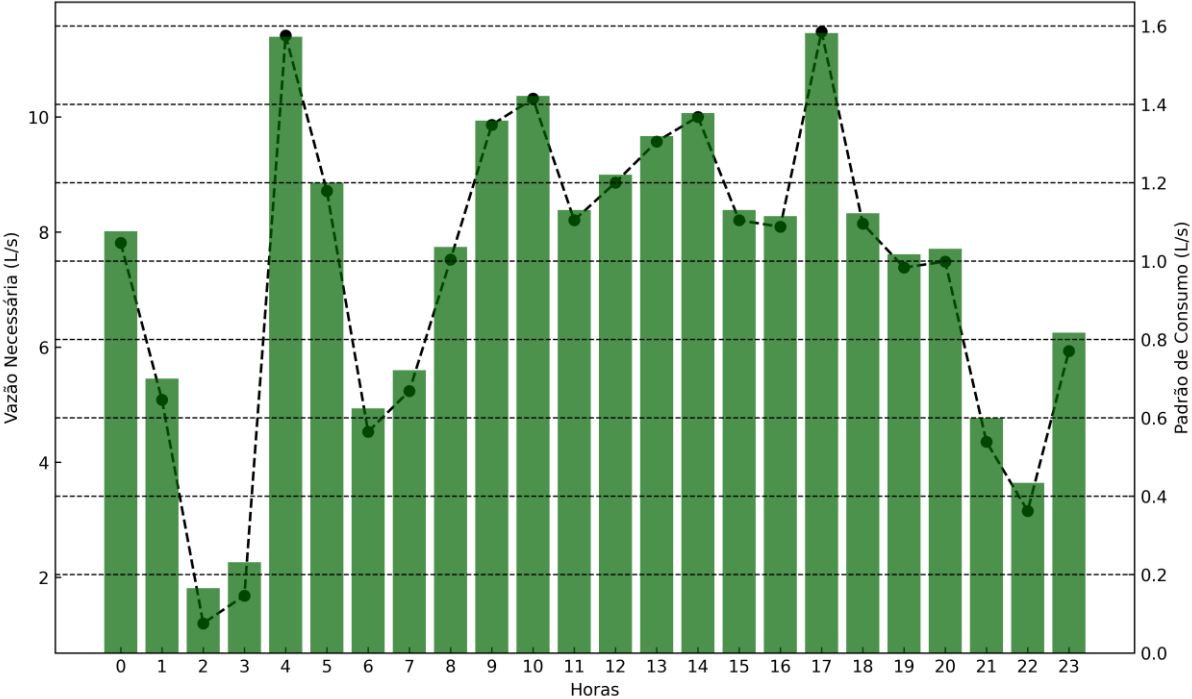


Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

O sistema de bombeamento é composto por quatro poços (Poço 1, Poço 2, Poço 3 e Poço 4), cada um equipado com uma bomba específica (B1, B2, B3 e B4). Todas as bombas estão diretamente conectadas ao sistema de abastecimento, convergindo para um único ponto de consumo, o nó FIT_01. Conforme apresentado na operação real, na modelagem as bombas foram configuradas para operarem em paralelo. Conforme apresenta a Figura 16, contudo cada bomba possui características distintas como apresentadas na Tabela 1, todas as curvas tanto da bomba quanto de rendimento foram utilizadas para cada bomba.

Na modelagem, também foi inserido o padrão de consumo, definido com base nos resultados apresentados na seção 4.3. O perfil adotado para a simulação corresponde ao consumo registrado em um domingo do mês de março, sendo utilizado como referência para modelar a demanda da fábrica, pois representa o cenário de maior vazão no período analisado, conforme ilustrado na Figura 17.

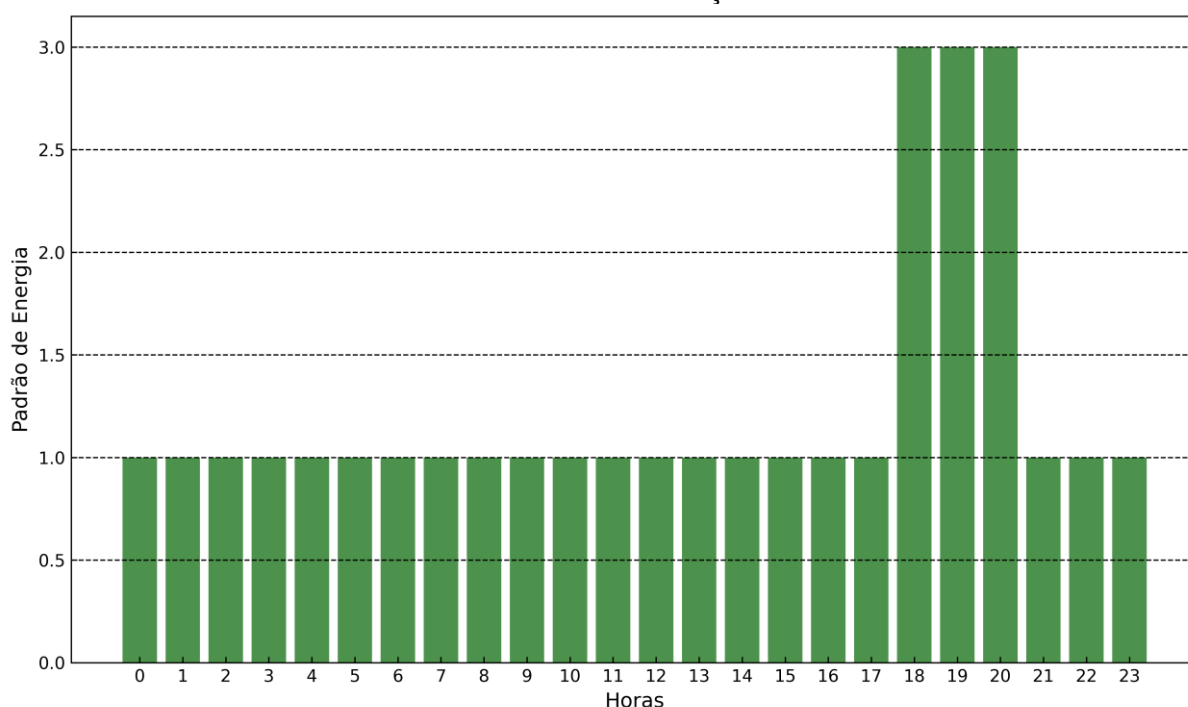
FIGURA 17 - PADRÃO DE CONSUMO DE ÁGUA NO EPANET.



Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

Como apresentado na Figura 17, os horários de maior consumo são as 4 da manhã e as 17 horas, e o horário de menor consumo apresentado são as 2 da manhã. Com esse perfil implementado, foi implementado o perfil de consumo de energia com os preços apresentados na Tabela 3. O padrão de energia utilizado se apresenta na Figura 18.

FIGURA 18 - PADRÃO DO PREÇO DA ENERGIA.

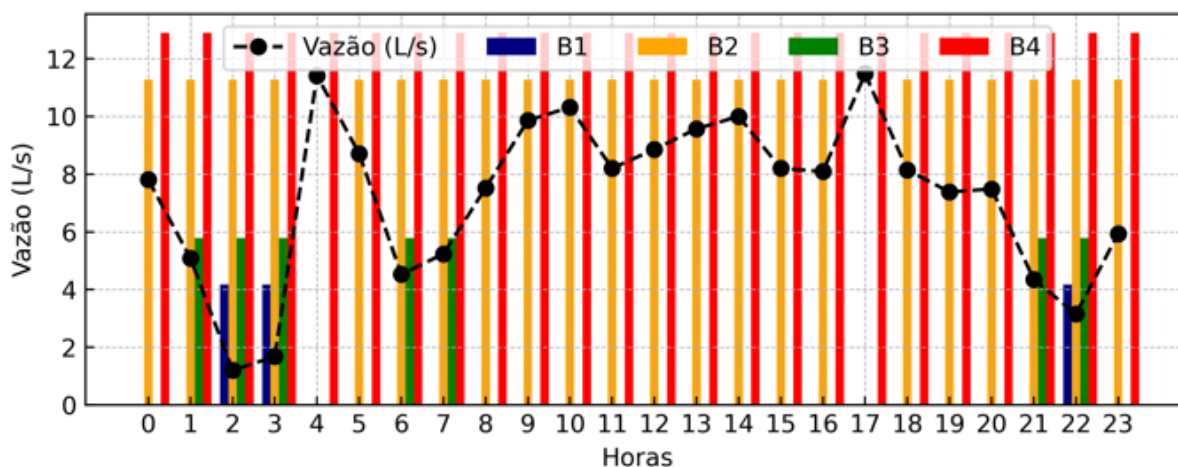


Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

O padrão da Figura 18, foi implemmentando no EPANET, considerando os valores de ponta e fora ponta de consumo e da demanda, e por uma relação que os valores na ponta são 3 vezes os valores dos horários na fora ponta

Para conseguir obter o menor custo energético e a melhor eficiência das bombas, foi realizada a análise de utilizar apenas uma bomba para o acionamento horário, visto que suas características mecânicas e elétricas são distintas. A Figura 19 apresenta como cada bomba se comporta diante do perfil de vazão apresentada no eixo secundário da Figura 17.

FIGURA 19 - CAPACIDADE MÁXIMA DE VAZÕES DAS BOMBAS E PERFIL DE CONSUMO.

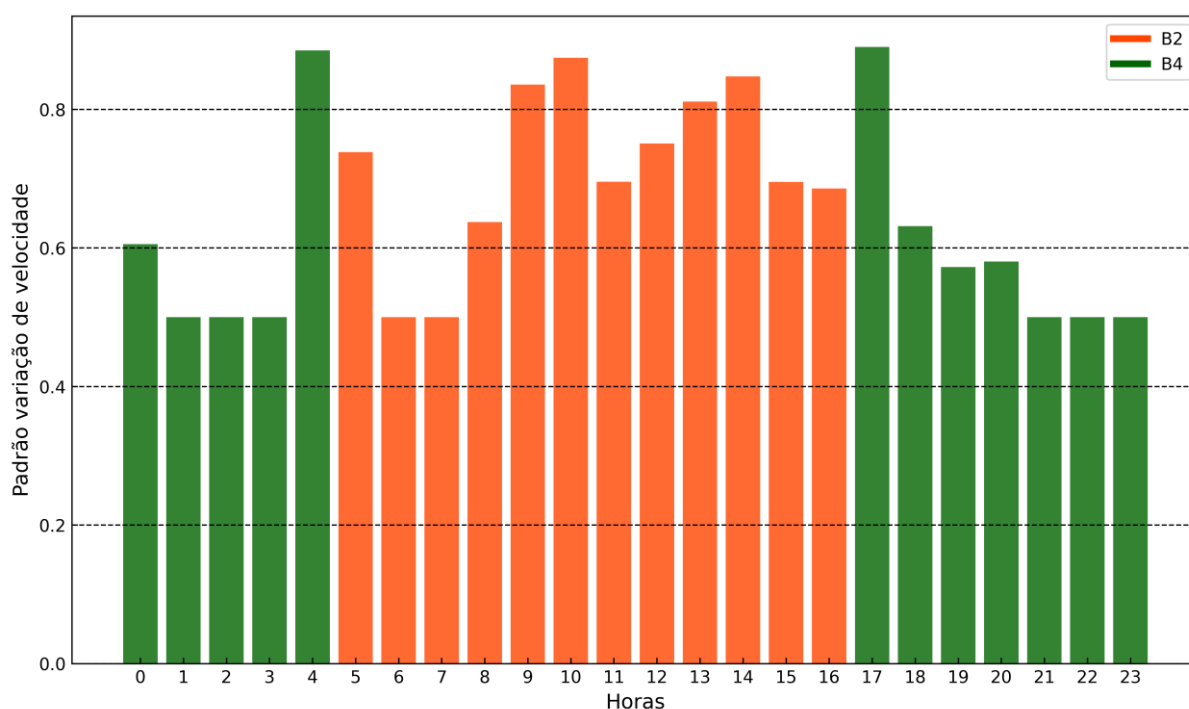


Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

Como é apresentado na Figura 19 a bomba B4 tem capacidade de ser ativada em todos os horários do dia, devido a vazão apresentada na Tabela 1. A bomba B1 tem capacidade de entrar nos horários de menor consumo, que são das 2 as 3 horas da manhã, a B3 tem capacidade de ser ativada nos horários de 1, 2, 3, 6 e 7 da manhã e a noite nos horários da 21 e 22 horas. A B2 não tem capacidade de ser ativada nos horários de 4 da manhã e as 17 horas.

Diante disso, foi implementado um controle programado de que a bomba B2 fosse ativada das 5 da manhã as 16 horas, e que a bomba B4 fosse ativada nos demais horários do dia, como descrito na seção 4.4. E para a análise do inversor de frequência na modelagem no EPANET foi definido o padrão da velocidade das bombas para como é apresentada na Figura 20.

FIGURA 20 - PADRÃO DE VELOCIDADE DAS BOMBAS.



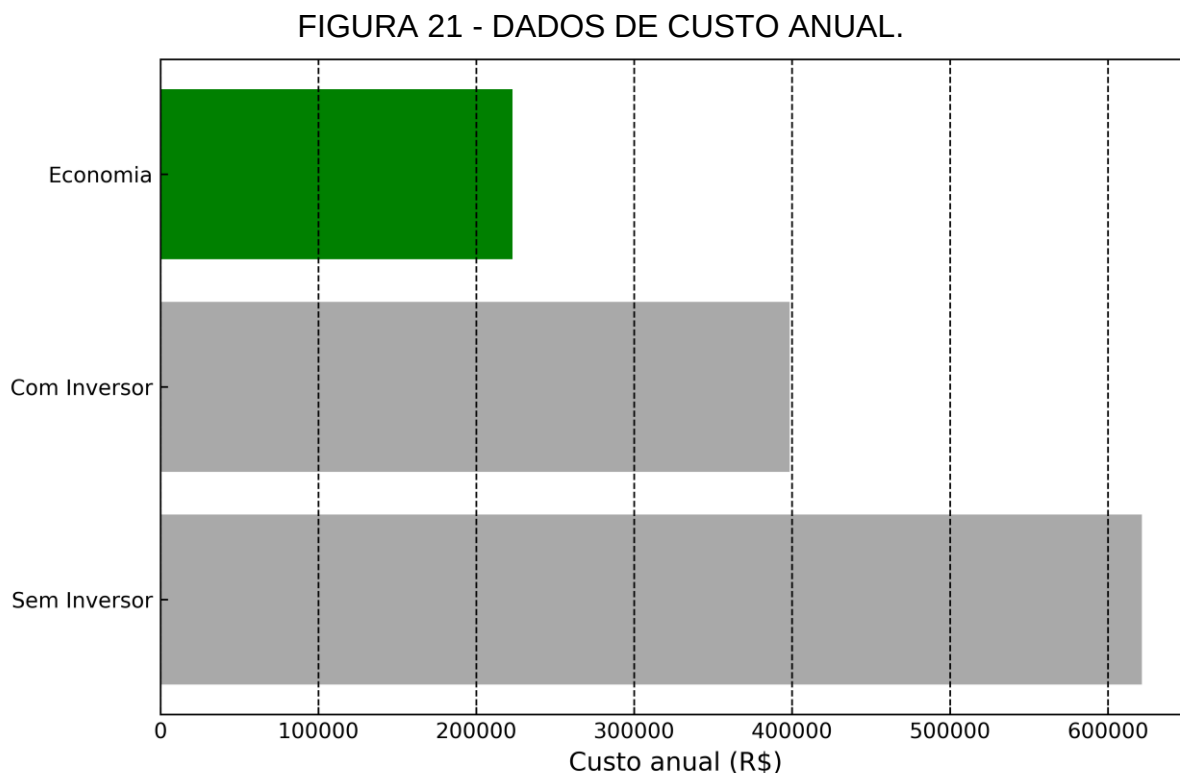
Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

O padrão de velocidade de rotação das bombas foi determinado por meio das equações de afinidade apresentadas na seção 4.5.2. O gráfico exibe esse padrão de velocidade, com as colunas em verde representando a variação horária da bomba B4 e em laranja a da bomba B2. Esses valores foram obtidos a partir da equação de afinidade e utilizados para determinar a frequência de operação, conforme descrito na Equação 2. A faixa de operação do CMB com inversor é ilustrada na Figura 9. Nesse gráfico, os valores das colunas variam entre 0,5 e 1, onde 0,5 indica que a bomba opera a uma frequência de 30 Hz, enquanto valores superiores a 0,8 indicam operação próxima à frequência máxima de 60 Hz.

O controle programado foi utilizado para delimitar os horários de ativação das bombas B2 e B4, em que B2 foi ativada nos horários de 5 a 16 horas e a B4 nos demais horários, essa etapa é descrita na seção 4.4, o controle e o padrão de velocidade de rotação das bombas atendem ao perfil de consumo apresentado na Figura 17.

A implementação do inversor na modelagem hidráulica, apresentado na Figura 20, foi utilizado na segunda simulação, descrita na seção 4.4 e utilizado para fazer uma comparação com a primeira que não utilizava o inversor na operação,

apresentada na mesma seção. Os resultados em custos operacionais da primeira simulação e da segunda, e a diferença dessas simulações estão apresentados na Figura 21.



Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

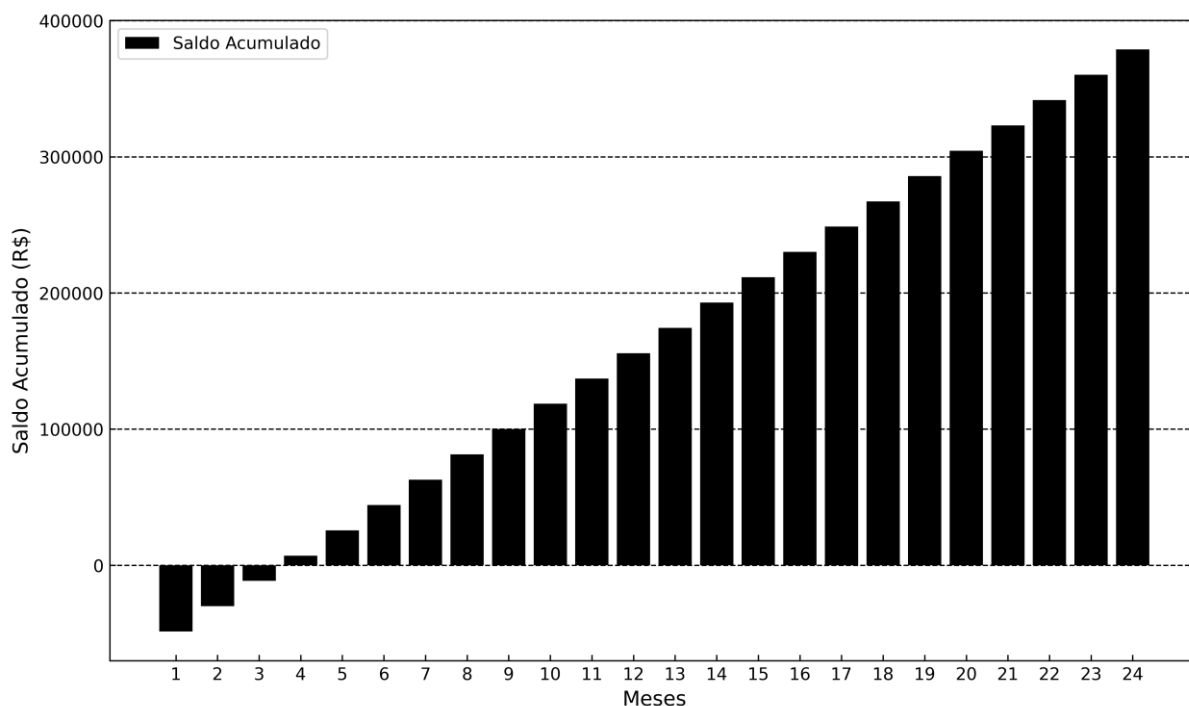
A Figura 21 apresenta os custos anuais dessas duas simulações, em que a operação sem inversor (terceira barra), consiste na primeira simulação, o resultado da barra com inversor (segunda barra), consiste na segunda simulação e a barra em verde, denominada como economia, é resultante da diferença da operação anual com e sem inversor de frequência na operação das bombas B2 e B4 que fazem parte do setor de captação de água dos poços.

Conforme apresenta o gráfico da Figura 21, considerando a economia obtida, foi realizada a cotação de dois inversores para as bombas B2 e B4, com potências mecânicas de 40 CV e 60 CV, respectivamente, e alimentação trifásica de 380V, conforme descrito na seção 4.5.3.

O investimento inicial de R\$ 67.260,00, que abrange o custo de dois quadros e dos dois inversores, resultou em um payback de 4 meses, uma Taxa Interna de

Retorno (TIR) de 27,55% e um Valor Presente Líquido (VPL) de R\$ 326.574,95. Para o cálculo, foi considerada a taxa Selic de 12,25% ao ano, referente ao ano de 2024, e o prazo estimado de 24 meses, o gráfico do Payback é apresentado na Figura 22.

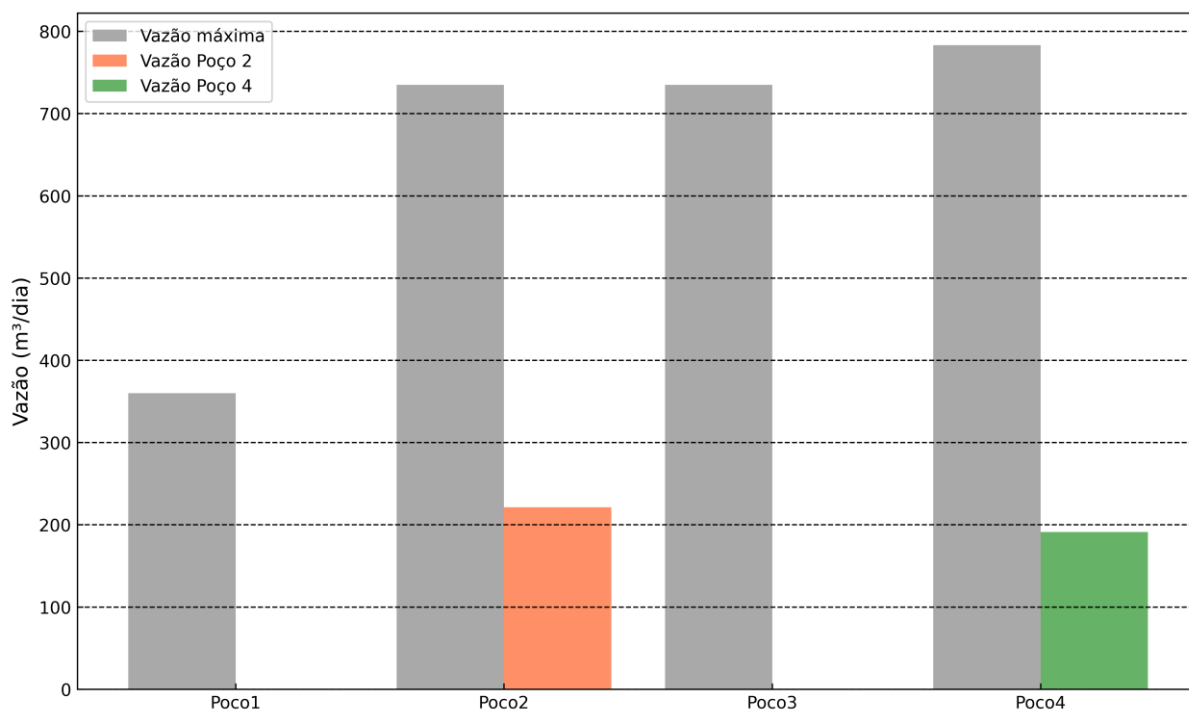
FIGURA 22 - GRÁFICO DO PAYBACK.



Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

Além do levantamento de custos e da economia anual obtida, uma preocupação levantada durante as visitas foi a capacidade diária de geração dos poços, considerando a adoção do agendamento de ativação das bombas. A Figura 23 ilustra, em cinza, a quantidade de água bombeada permitida em m³/ dia, bem como os volumes bombeados pelas bombas B2, na cor laranja e B4 na cor verde ao longo de 24 horas com o agendamento da operação em m³/dia.

FIGURA 23 - DADOS DE VAZÃO BOMBEADOS.



Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

Conforme ilustrado na Figura 23, o volume máximo permitido para o Poço 2 é de 735 m³/dia, sendo que o volume bombeado no agendamento estimado representou mais de 30% dessa capacidade. Já o Poço 4, com limite de 785 m³/dia, teve um bombeamento de 192 m³/dia, correspondendo a cerca de 25% de sua capacidade de bombeamento máxima.

5.3 RESULTADOS DA MODELAGEM HIDRÁULICA E DA CALIBRAÇÃO

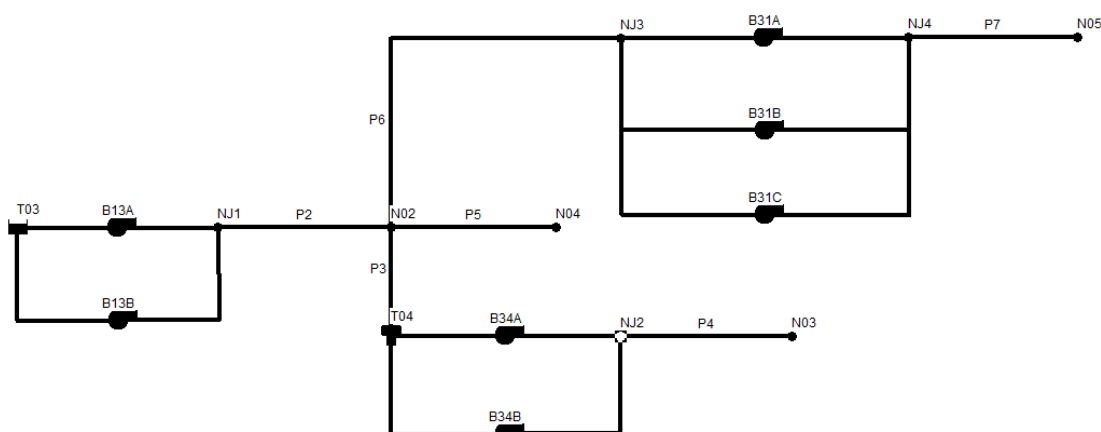
Este tópico apresentará os resultados obtidos da modelagem hidráulica do setor de distribuição de água do forno. Os resultados apresentados derivam da modelagem hidráulica realizada com o EPANET, integração da linguagem Python ao software de simulação hidráulica e aplicação de algoritmos evolutivos para estimar os parâmetros do SAA. Os resultados aqui apresentados derivam da utilização de um método para calibrar o modelo hidráulico simulado para que ele reflita com maior precisão a operação real da planta industrial.

5.3.1 MODELAGEM HIDRÁULICA DO SETOR DE ÁGUA DO FORNO.

A Figura 24 ilustra os resultados da modelagem em EPANET para o setor responsável pela distribuição de água na fabricação de vidros. O objetivo da modelagem desse setor é obter dados de vazão em trechos que não tem sensoramento e estimar dados de pressão e perda de carga, a partir dos parâmetros de entrada apresentados na seção 4.6.1, a modelagem desse setor foi utilizada para obter os resultados apresentados nessa seção e na seção 5.3.2.

A modelagem apresenta os componentes da rede de distribuição de água, destacando a configuração da operação do sistema, conforme foi ilustrado na Figura 10.

FIGURA 24 - MODELAGEM HIDRÁULICA DO SETOR DE ÁGUA DO FORNO.



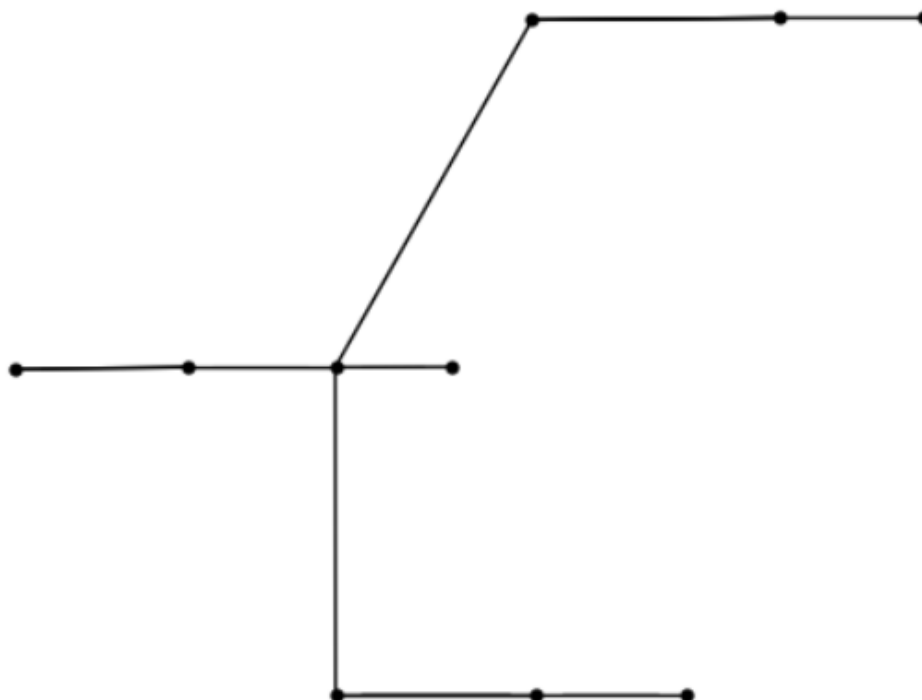
Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

Foi considerado um reservatório de nível fixo (T03) para representar os tanques TQ_01 e TQ_02, e a operação das bombas em paralelo (B13A e B13B) que distribuem a água que passa pelo FIT_02, ambas as bombas tem características elétricas e mecânicas idênticas, com potência mecânica de 25 HP. O FIT_02 foi considerado como ponto de consumo na entrada dos tanques e foi utilizado o perfil e o padrão de consumo dos pontos de medição FIT_02 e FIT_03. Para trabalhar com os tanques comunicantes (TQ_03, TQ_04 e TQ_05), esses tanques foram considerados como um único Reservatório de Nível Variável, e foi considerado a soma da capacidade total de m³ dos tanques (TQ_03, TQ_04 e TQ_05), o nível médio dos níveis máximos e dos

níveis mínimos para emular a operação da variação de água na saída do RNV, apresentado como o identificador (T04), na saída do RNV tem-se duas bombas operando em paralelo para distribuir a água até o trecho final TQ_06, ambas as bombas são idênticas e tem potencia mecânica de 20 HP. O TQ_06 foi emulado como um nó de consumo denominado N03. Os nós NJ1 e NJ2 são nós de junção das tubulações.

O resultado apresentado na Figura 24 foi fundamental para as análises subsequentes. A Figura 25 ilustra a modelagem realizada por meio da integração do EPANET com a linguagem Python, utilizando a biblioteca WNTR. Nesta configuração, a biblioteca permite a análise detalhada de nós e trechos, permitindo o acesso aos parâmetros construtivos da rede de distribuição de água a avaliação das variáveis hidráulicas do sistema simulado.

FIGURA 25 - MODELAGEM HIDRÁULICA DO SETOR DE ÁGUA DO FORNO COM A BIBLIOTECA WNTR.

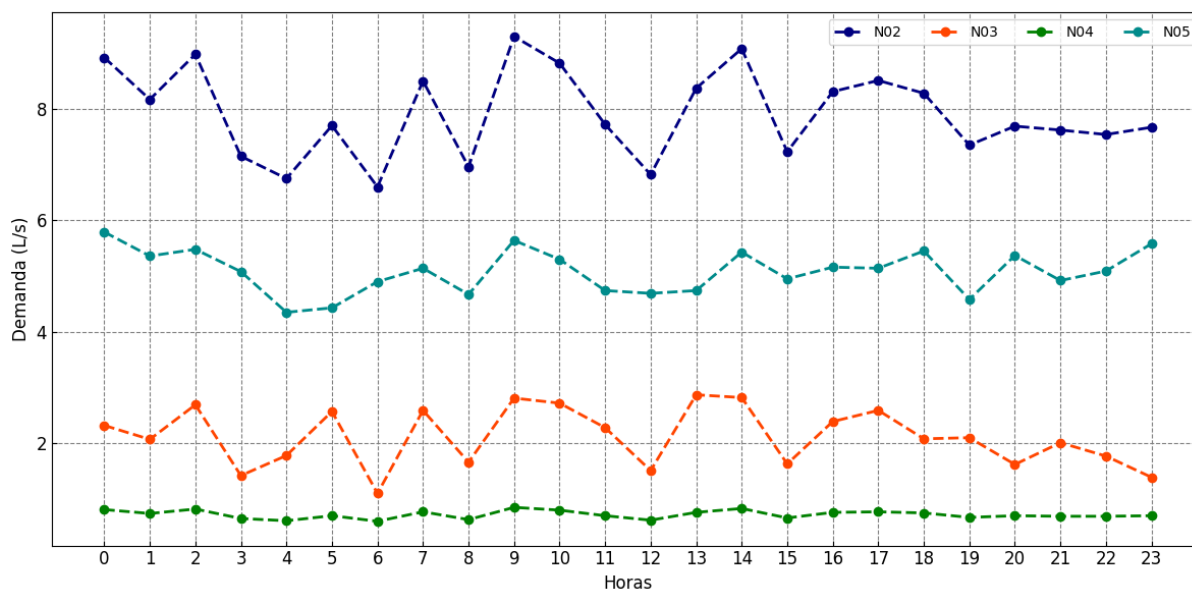


Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

A modelagem do SAA industrial descrita na 4.6.1, teve como resultados de análise valores médios de pressão, vazão, perda de carga, a partir da demanda da

rede dos nós N02, N03, N04 e N05, apresentado na Figura 26. A demanda está sendo apresentada em L/s, e na saída da simulação do modelo em EPANET a unidade utilizada é o LPS.

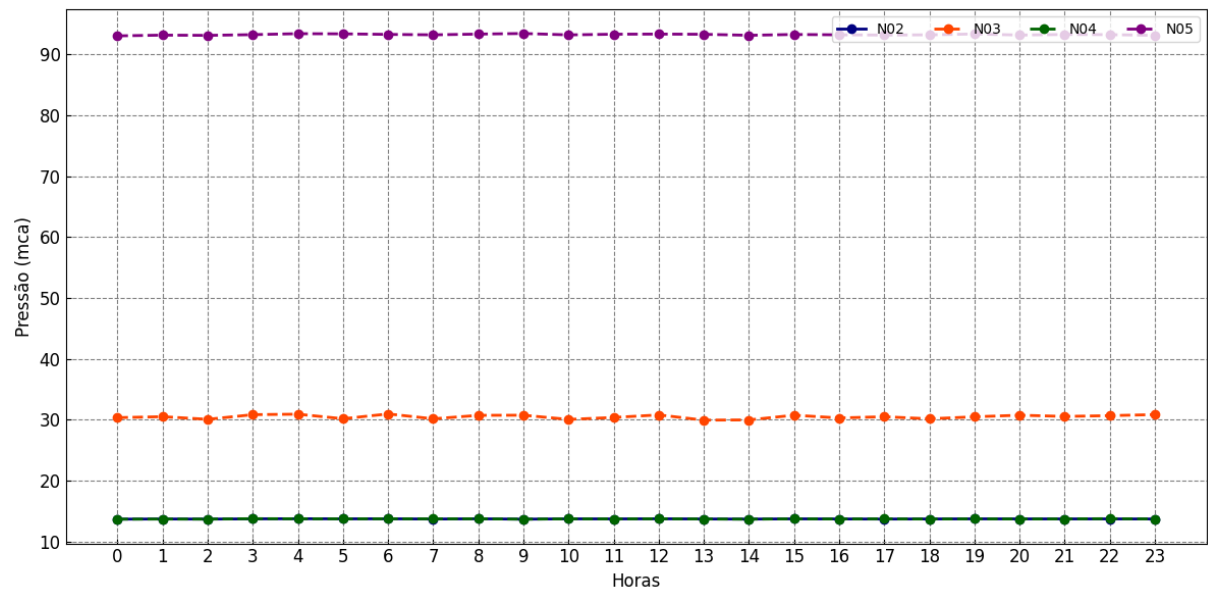
FIGURA 26 - RESULTADOS DAS DEMANDAS NOS NÓS.



Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

Conforme apresenta a Figura 26, os valores de demanda de água no N02 e N03, foram obtidos do histórico de vazão do setor industrial, as demandas dos nós N04 e N05 foram estimadas pela modelagem hidráulica. Essas demandas e todas as características construtivas do modelo no EPANET possibilitaram obter os valores de pressão nos nós N02, N03, N04 e N05, como apresentada na Figura 27.

FIGURA 27 - RESULTADOS DA PRESSÕES NOS NÓS.

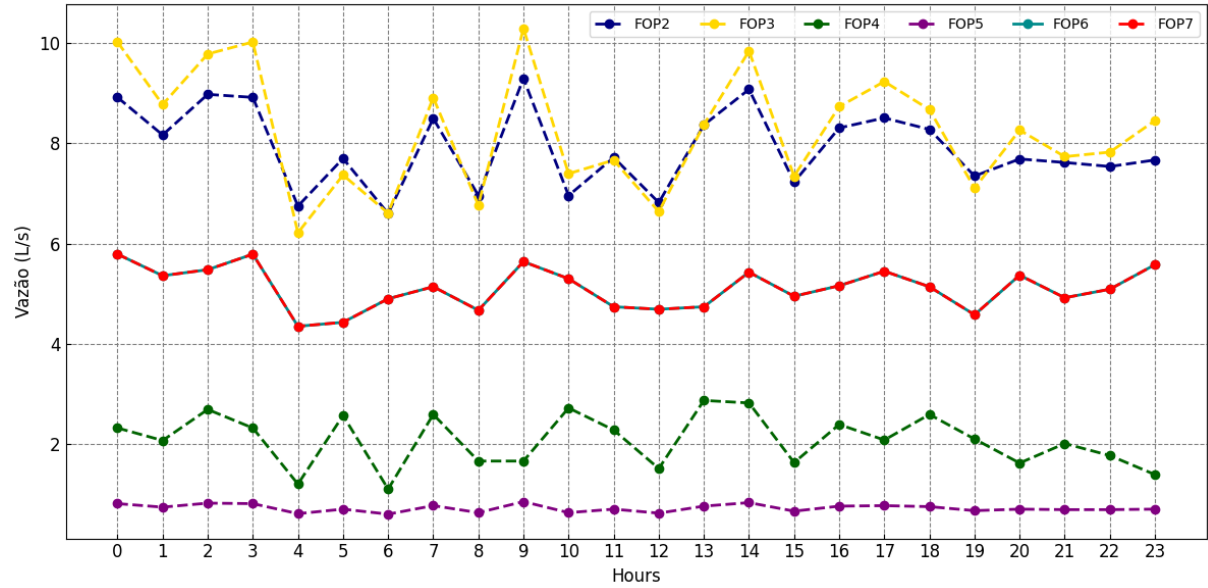


Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

O N05 na linha tracejada púrpura se apresentou como o maior valor de pressão do setor industrial, enquanto a pressão nos nós N02 e N03 obtiveram valores tendendo a semelhantes em virtude que as linhas do N02 na cor azul e a N03 na cor laranja estão sobrepostas no período de análise das 24 horas de análise do setor industrial. O nó N04 manteve uma pressão em torno de 30 mca.

Os resultados de vazão nos trechos P2, P3, P4, P5, P6 e P7 estão apresentadas na Figura 28, foram obtidas a partir da demanda dos nós do modelo hidráulico do setor água do forno no EPANET, obtidos na Figura 28**Erro! Fonte de referência não encontrada..**

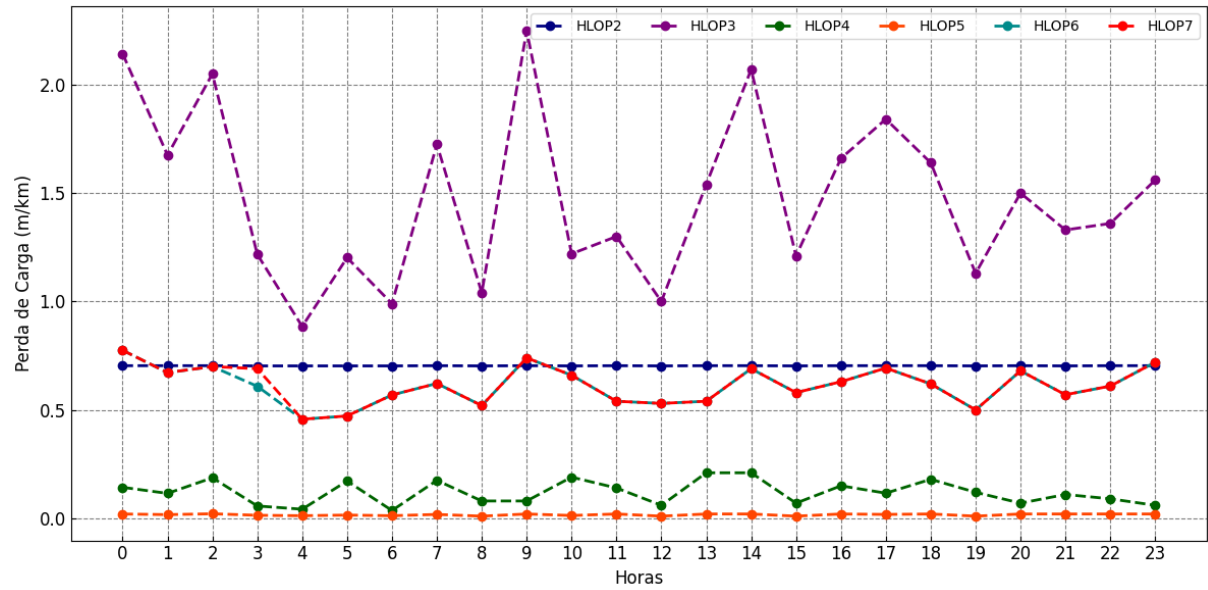
FIGURA 28 - RESULTADOS DAS VAZÕES NOS TRECHOS.



Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

Os maiores valores de vazão foram observados nas tubulações FOP2, representada pela linha azul no gráfico, e FOP3, indicada pela linha amarela. O trecho com a menor vazão foi o correspondente à linha púrpura FOP5. Os valores de perda de carga para cada tubulação foram obtidos e estão apresentados na Figura 29.

FIGURA 29 - RESULTADOS DAS PERDAS DE CARGA NOS TRECHOS.



Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

A tubulação que apresentou a maior perda de carga foi a HLOP3, representada pela linha tracejada de cor púrpura. O trecho com perda de carga mais constante foi a tubulação HLOP2. Os gráficos da tubulação HLOP7, em vermelho, e HLOP6, em ciano, mostram valores próximos de equivalência, e durante o maior período temporal, esses gráficos se sobrepõem.

Os resultados e as informações obtidas na modelagem foram utilizados para a calibração do modelo com o algoritmo da EE, e são apresentados na seção a seguir.

5.3.2 RESULTADOS CALIBRAÇÃO

A inicialização do EE foi apresentada na Figura 11. Foram realizadas diversas simulações, conforme detalhado na seção 4.6.2. As entradas do algoritmo, incluindo população, geração total, taxa de cruzamento, taxa de mutação e os coeficientes de rugosidade aleatórios gerados para cada simulação, estão descritas na Tabela 4.

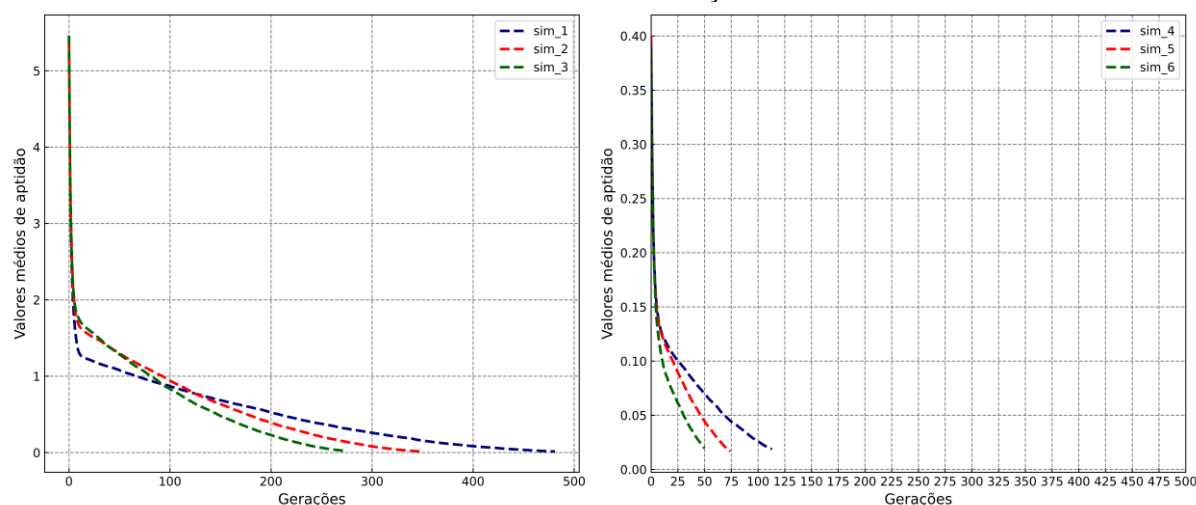
TABELA 4 - CONVERGÊNCIA DO ALGORITMO EE.

Simulação	População	Geração Total	Taxa de cruzamento	Taxa de mutação	Geração de convergência	Coefficiente de rugosidade
I	500	500	0,85	0,01	481	110-140
II	500	500	0,85	0,03	347	110-140
III	500	500	0,85	0,05	274	110-140
IV	500	500	0,85	0,01	113	130-140
V	500	500	0,85	0,03	74	130-140
VI	500	500	0,85	0,05	50	130-140

Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

A variabilidade das simulações teve como objetivo verificar em quais casos o critério de parada do algoritmo foi atendido e como a variação da taxa de mutação e a faixa de rugosidades aleatórias influenciam o desempenho do algoritmo evolutivo. Os resultados de cada simulação, apresentados na Tabela 4, mostram as gerações em que os critérios de convergência foram atendidos. A Simulação I levou mais tempo para atingir o erro de vazão menor ou igual a 3%, convergindo na geração 481 de 500. Já a Simulação VI teve o melhor desempenho, alcançando a convergência na geração 50. Os resultados confirmam que a taxa de mutação impacta diretamente a rapidez da convergência, pois, com taxa de 5%, o número de gerações necessárias foi de 274 e 50, respectivamente, como ilustrado na Figura 30.

FIGURA 30 - VALORES DE CONVERGÊNCIA DO ALGORITMO EE DAS SIMULAÇÕES.

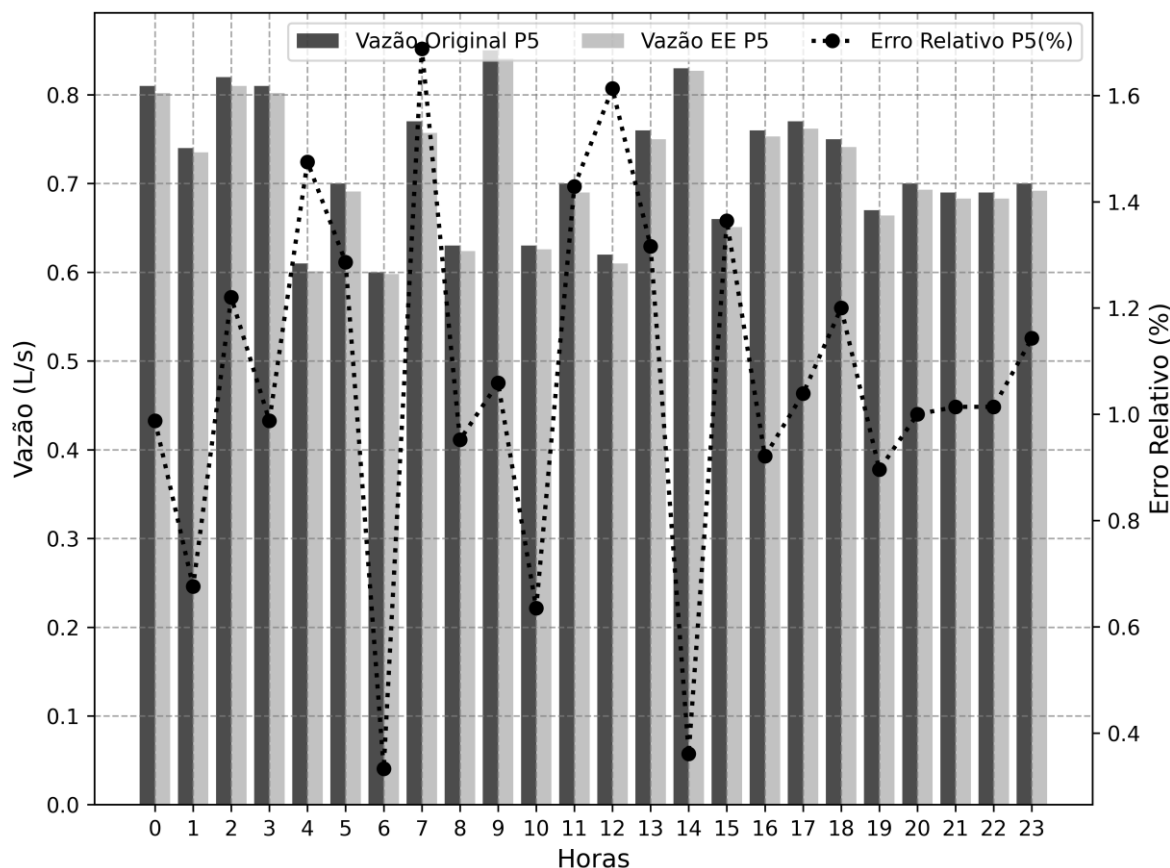


Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

Os valores de vazão nos trechos, obtidos a partir da Simulação VI, incluem o cálculo do erro relativo entre a vazão original, determinada pelas demandas da rede, e a vazão estimada pelo algoritmo de Estratégias Evolutivas. Nos gráficos, as vazões são representadas por colunas nos eixos principais, enquanto o erro relativo, expresso em porcentagem (%), é exibido no eixo secundário por meio do gráfico de linha.

A Figura 31 apresenta os resultados para o trecho P5, a Figura 32 exhibe os dados referentes ao trecho P2 e a Figura 33 mostra os resultados para o trecho P7. Nesses gráficos, a vazão original é representada pela cor cinza escuro, enquanto a vazão estimada pelo algoritmo é ilustrada em cinza claro.

FIGURA 31 - RESULTADOS DO ALGORITMO EE DAS VAZÕES NO TRECHO P5.

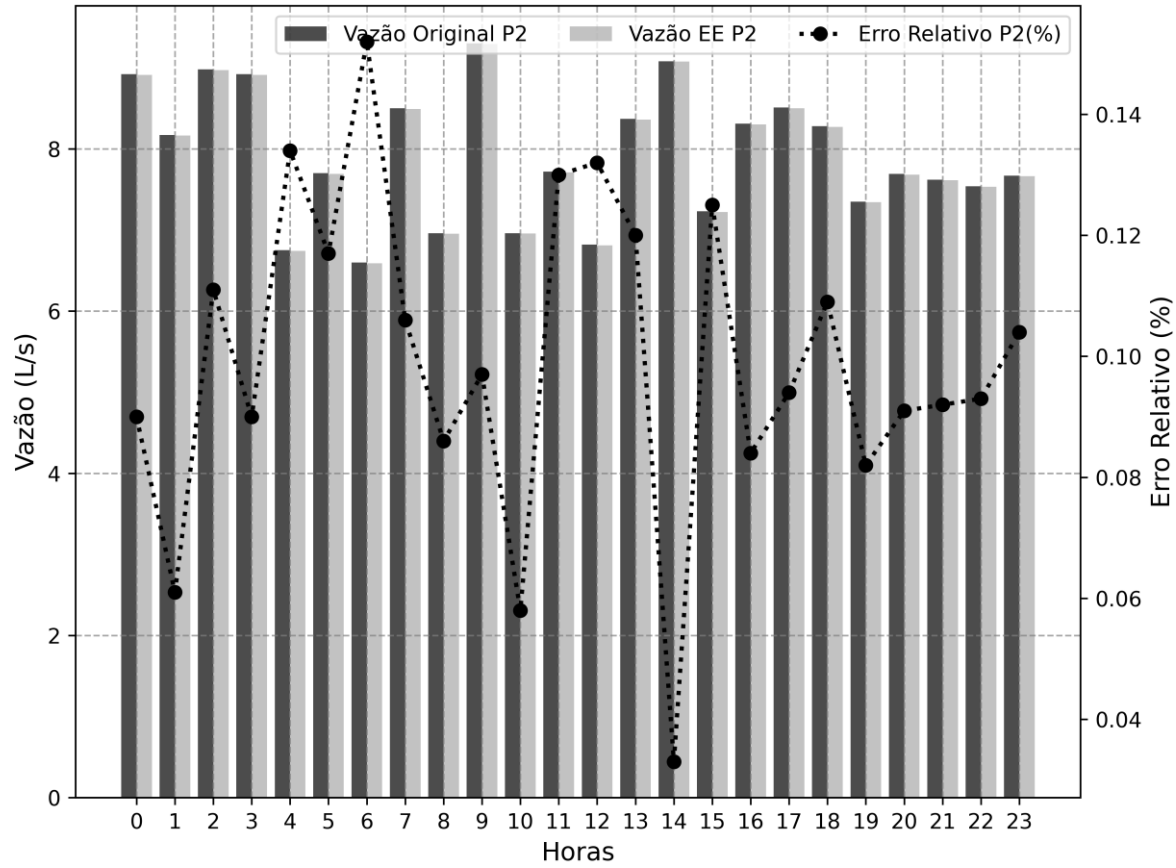


Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

O trecho P5, Figura 31 - RESULTADOS DO ALGORITMO EE DAS VAZÕES NO TRECHO P5, concentra os maiores erros relativos ao longo do dia, frequentemente superiores a 1,0% e alcançando o pico de 1,613% às 12 horas. Durante os horários de maior consumo, entre 12 e 15 horas, os erros ultrapassam 1,3%.

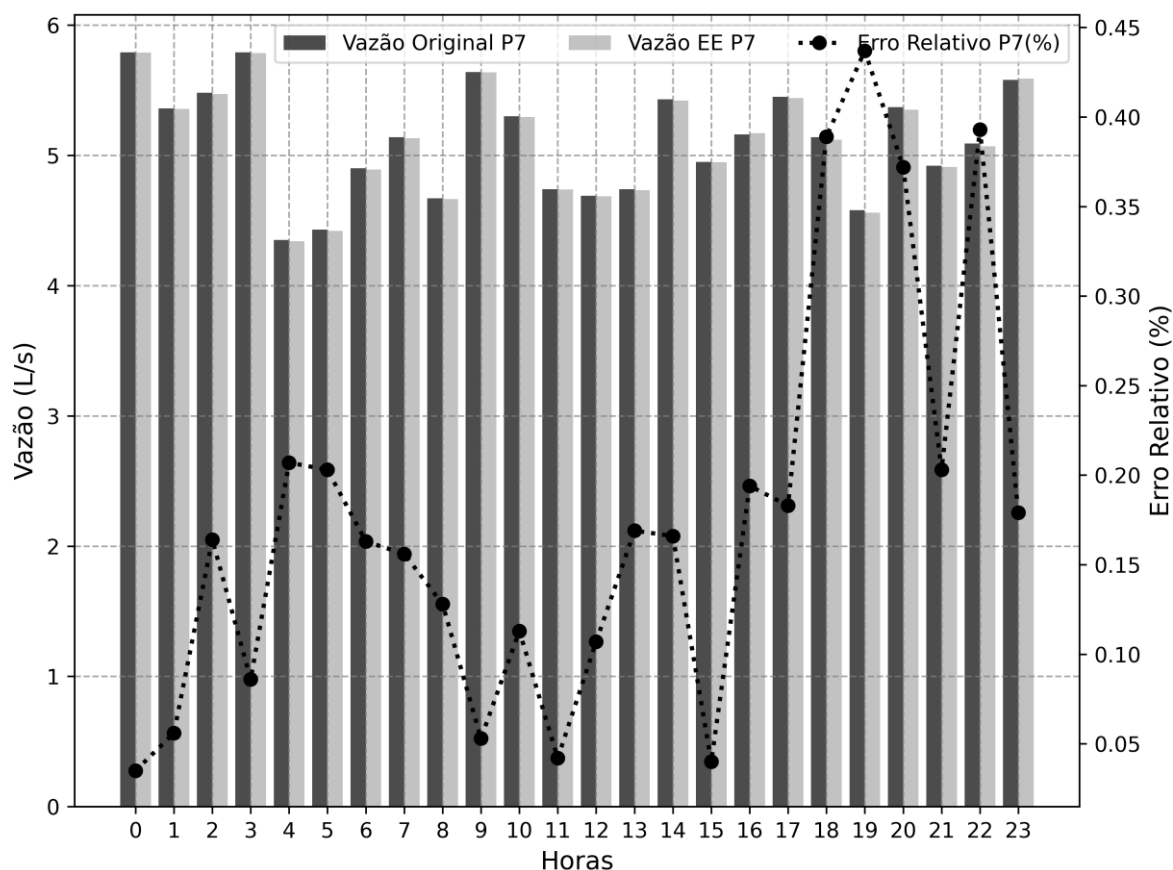
Em contraste, os trechos P2 e P7 apresentados respectivamente nas Figura 32 e Figura 33 os menores erros, geralmente abaixo de 0,2%, evidenciando boa precisão na estimativa para essas tubulações ao considerar o erro mínimo de 3%, como critério de parada do algoritmo.

FIGURA 32 - RESULTADOS DO ALGORITMO EE DAS VAZÕES NO TRECHO P2.



Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

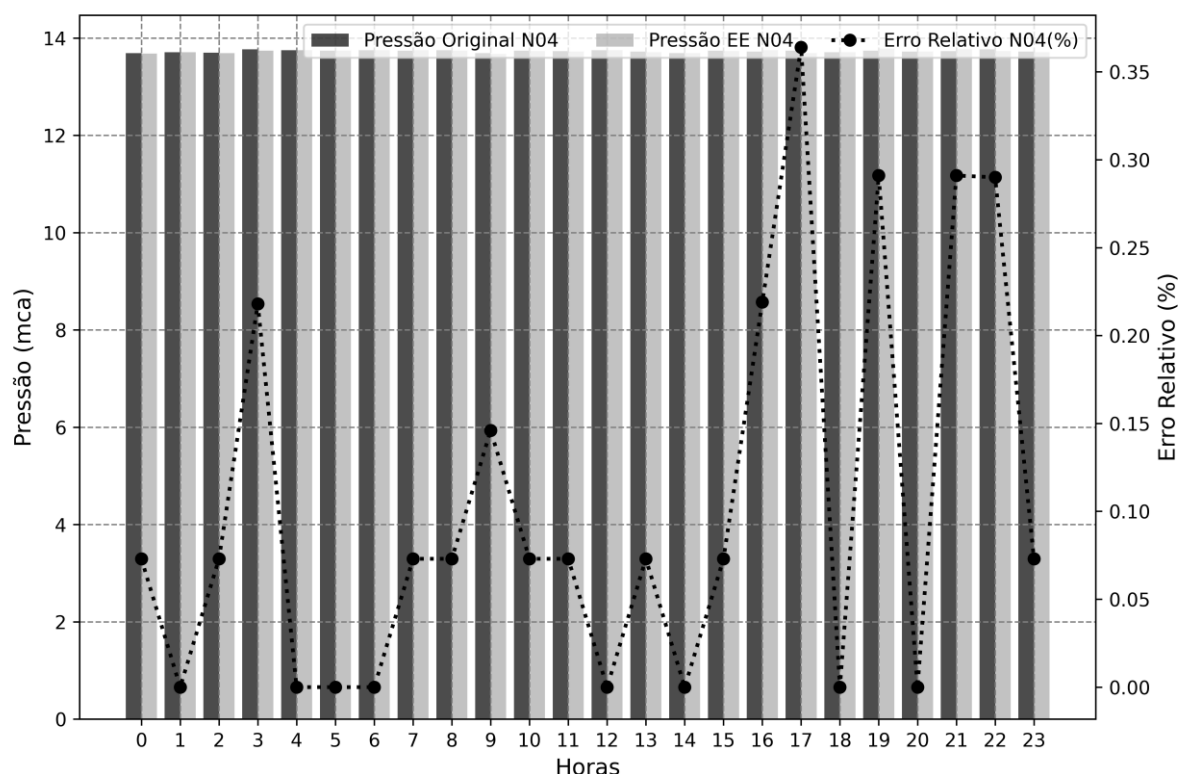
FIGURA 33 - RESULTADOS DO ALGORITMO EE DAS VAZÕES NO TRECHO P7.



Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

Os valores de vazão gerados pelo algoritmo EE permitiram a re-simulação da rede, possibilitando a obtenção das pressões nos nós N02, N03, N04 e N05, conforme apresentado na Figura 34. Com base nesses resultados, foi calculado o erro relativo, em porcentagem, comparando as pressões determinadas pela vazão original com as pressões obtidas a partir da vazão pelas estimativas do algoritmo das EE para o nó N04.

FIGURA 34 - RESULTADOS DO ALGORITMO EE DAS PRESSÕES NO N04.

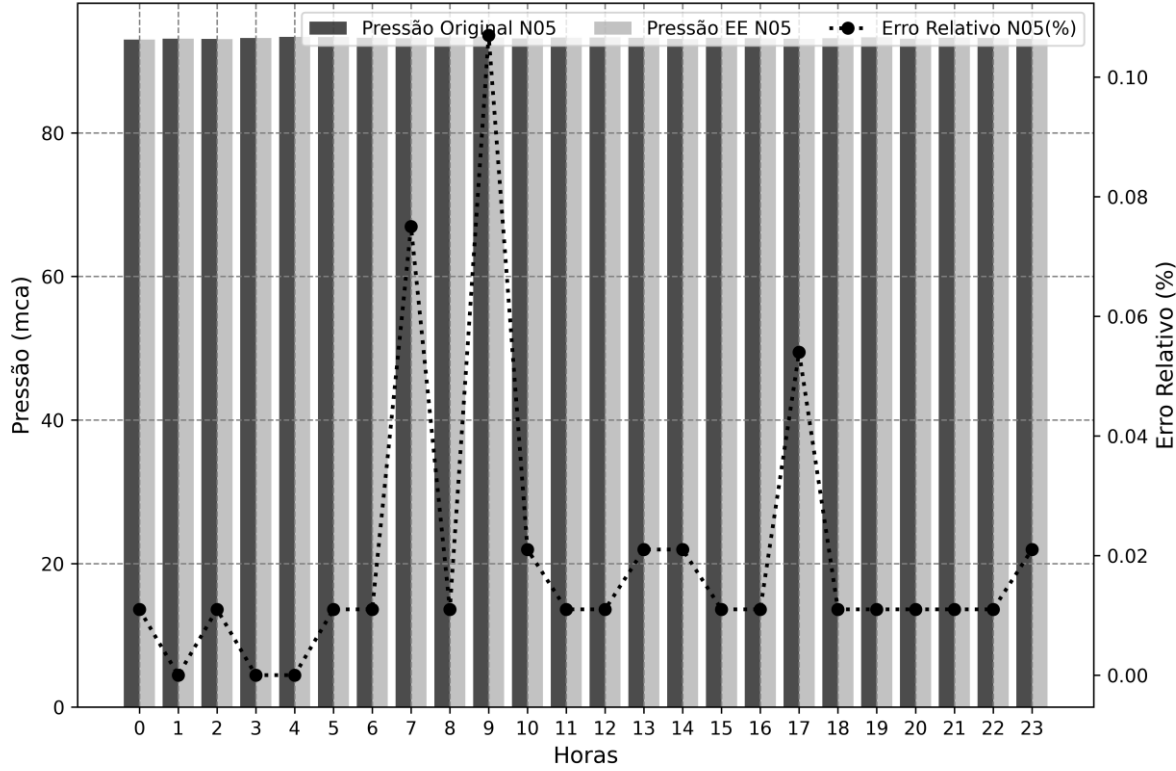


Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

Os resultados apresentados na Figura 34, refletem os erros relativos de pressão no nó N04, obtidos a partir da simulação da rede com a vazão gerada pelo algoritmo EE. De modo geral, os erros relativos são baixos, variando entre 0% e 0,35% em diversas horas, o que indica que o algoritmo evolutivo gerou estimativas de pressão precisas, especialmente em horários como 1, 4, 5, 6, 12, 14, 18 e 20. No entanto, nas 17, 19, 21 e 22 horas, observa-se um aumento nos erros relativos, com valores acima de 0,25%.

A Figura 35 apresenta o nó N05 com os menores erros relativos em (%), nos horários de 1, 3 e 4 horas, com valores tendendo a 0,00%. Os maiores erros relativos (%) observados estão nos horários de 7, 9 e 17 horas, com valores maiores de 0,04%. A variação nos erros ao longo do dia está associada às flutuações na demanda de água nos nós.

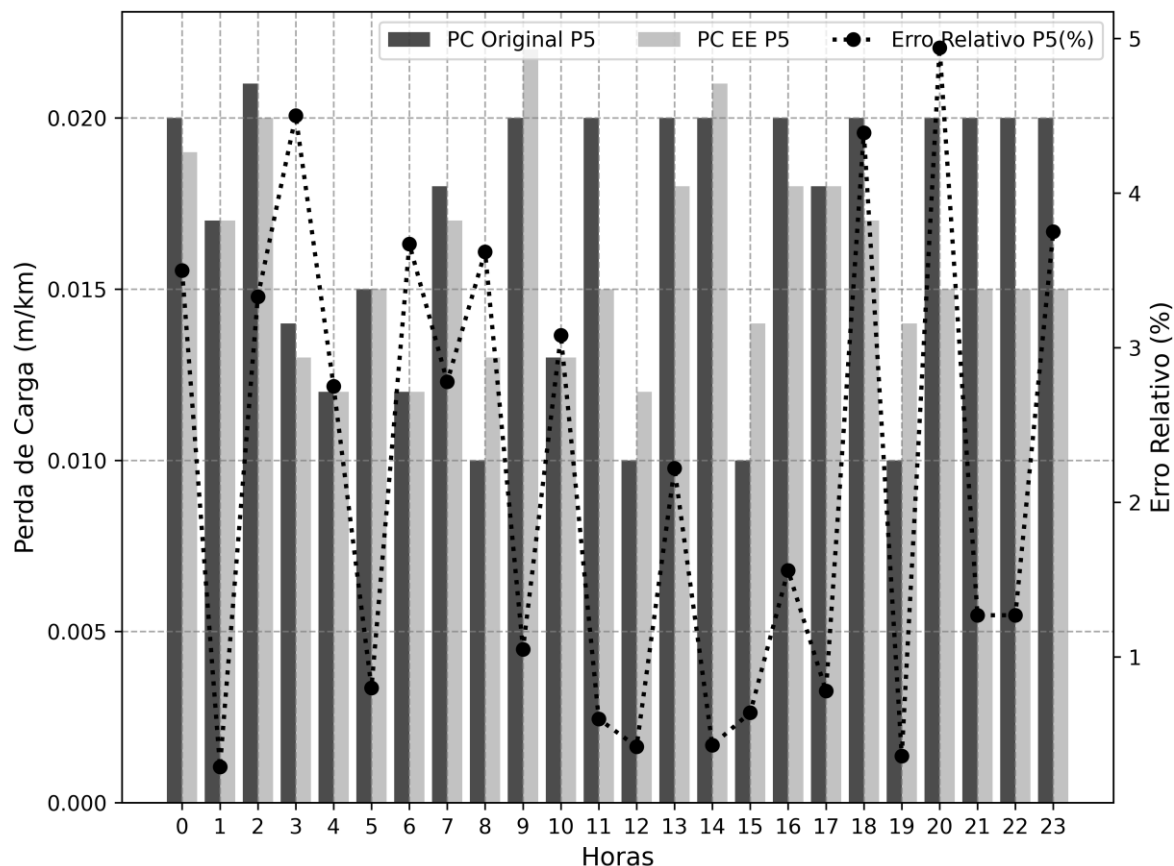
FIGURA 35 - RESULTADOS DO ALGORITMO EE DAS PRESSÕES NO N05.



Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

Para analisar a influência dos valores de vazão obtidos pelo algoritmo de Estratégias Evolutivas (EE), foram avaliadas as perdas de carga em cada tubulação com base nas vazões estimadas pelo algoritmo, conforme ilustrado nas Figura 36, Figura 37 e Figura 38.

FIGURA 36 - RESULTADOS DO ALGORITMO EE DAS PERDAS DE CARGA NO TRECHO P5.



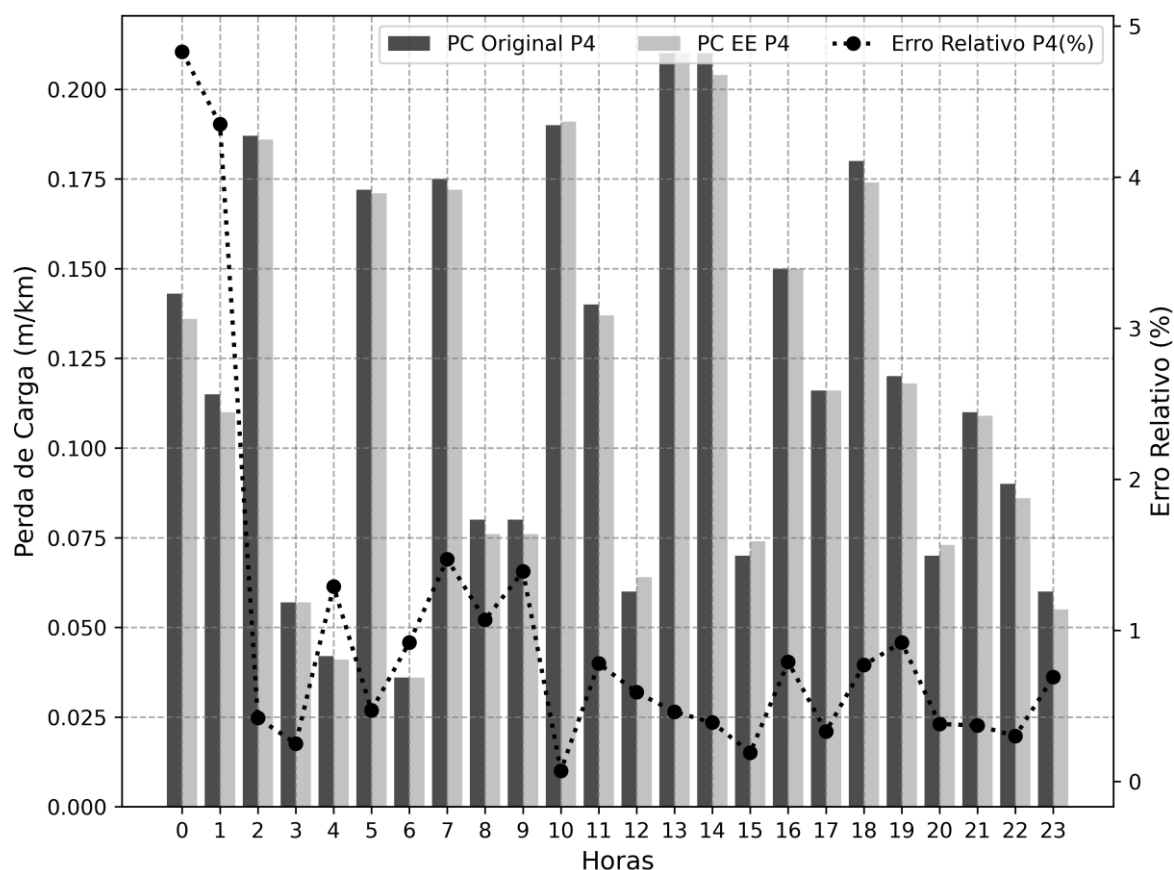
Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

A Figura 36 apresenta os erros relativos da perda de carga estimada pelo algoritmo evolutivo para as tubulações P5 ao longo de 24 horas, destacando a boa precisão das estimativas, com erros inferiores a 3%, especialmente nos horários de 1, 4, 5, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 21 e 22. No entanto, observa-se um erro relativo de 4,13% na tubulação P5 no horário 20. Esse erro está associado tanto à vazão estimada pelo algoritmo nesse horário, apresentada na Figura 31, como também ao fator C, que foi gerado de maneira aleatória. O valor do fator C encontrado não se aproximou do valor atribuído ao modelo da rede original, que é 140 para a tubulação de aço carbono.

A Figura 37 demonstra que o erro relativo do trecho P4 é superior a 3%, e ocorre em grande parte do período de 24 horas, com destaque para o horário da meia-noite, onde esse erro se aproxima de 5%. O erro acima de 3% pode ser explicado, assim como na análise do parágrafo anterior, pelo fato de o fator C apresentar um valor

distante do utilizado no modelo original. Além disso, é importante ressaltar que esse fator não foi minimizado na função objetivo, conforme apresentado na Equação 7.

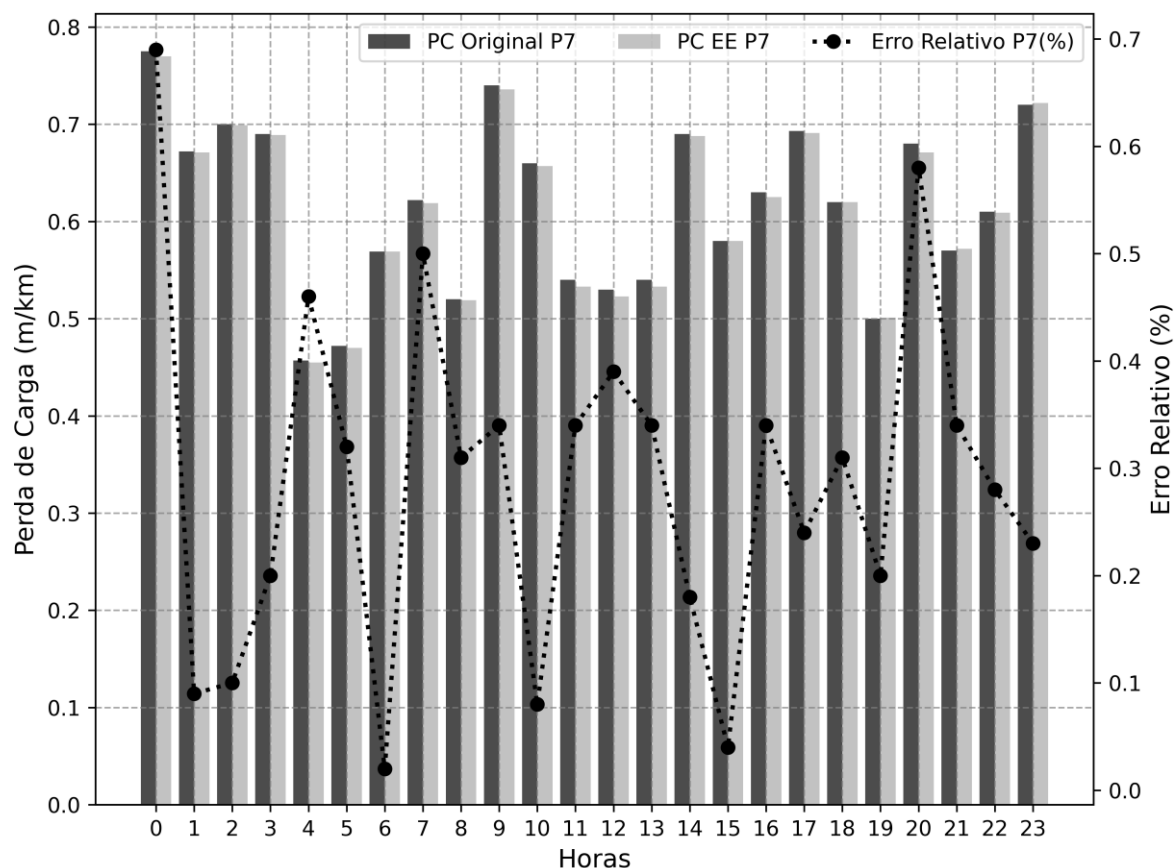
FIGURA 37 - RESULTADOS DO ALGORITMO EE DAS PERDAS DE CARGA NO TRECHO P4.



Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

O trecho P7, apresentado na Figura 38, apresentou o melhor desempenho na análise de calibração do modelo hidráulico, com erros relativos percentuais inferiores a 1%. Esses resultados foram obtidos a partir das vazões mostradas na Figura 33, nas quais os erros relativos de vazão também ficaram abaixo de 1%. Além disso, os valores aleatórios do fator C estavam próximos ao valor de 140, adotado para a tubulação de aço carbono.

FIGURA 38 - RESULTADOS DO ALGORITMO EE DAS PERDAS DE CARGA NO TRECHO P7.



Fonte: Dados da pesquisa. João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

De maneira geral, o algoritmo evolutivo demonstrou boa precisão, com erros inferiores a 5%, considerando que a perda de carga está associada a vazão e ao coeficiente de rugosidade das tubulações que foram aleatoriamente gerados, e que esse não foi minimizado no processo evolutivo, como as vazões do modelo do setor de água do forno.

6 DISCUSSÃO

A otimização da operação de bombas em sistemas industriais intermitentes é um tema amplamente estudado, especialmente devido à crescente necessidade de reduzir custos energéticos e melhorar a eficiência hidroenergética. Bouach e Benmamar (2019) destacam a importância de uma seleção estratégica das bombas, visando atender à demanda de vazão e controlar a pressão de maneira eficiente, evitando desperdícios no sistema de bombeamento. Essa abordagem é crucial em cenários onde, como observado na presente pesquisa, bombas de maior vazão foram inicialmente escolhidas para atender a um perfil de consumo de 24 horas, onde foram consideradas as características de cada bomba, e escolhidas a que apresentavam maior capacidade de bombeamento de água. No mesmo contexto, Kikomeko e Sempewo (2021) enfatizam a relevância de métodos que integram controle hidráulico e viabilidade econômica, garantindo retorno financeiro em projetos industriais. Esse aspecto foi comprovado nos resultados obtidos com a implementação de inversores de frequência, que permitiram ajustes dinâmicos da velocidade das bombas conforme o perfil horário de consumo, otimizando a operação e reduzindo os custos e as demandas de potência elétrica.

A adoção de inversores de frequência tem se mostrado uma solução eficaz para sistemas de bombeamento. Menke, Abraham e Stoianov (2016) e Ivanova e Ivanov (2020) destacam que essa tecnologia possibilita ajustes dinâmicos na velocidade de operação das bombas, reduzindo significativamente o consumo energético, tanto em períodos de baixa quanto de alta demanda. Por exemplo, na presente pesquisa, verificou-se que, em horários de maior demanda, a bomba operava a 80% de sua velocidade nominal, otimizando o desempenho e minimizando perdas. Estudos como os de Candilejo, Santillán e Garrote (2019) reforçam essa análise, evidenciando que inversores de frequência estão diretamente associados à redução de custos operacionais em sistemas de bombeamento. Nikolenko e Ryzhakov (2019) corroboram ao afirmar que o controle dinâmico da rotação das bombas contribui para a eficiência energética ao adaptar o funcionamento ao perfil de consumo.

Além disso, Luo, Xiong, Sun *et al.*, (2017) ressaltam a importância de uma análise técnica detalhada de sistemas com bombas centrífugas, garantindo confiabilidade e eficiência operacional. Gan, Pei, Pavesi *et al.*, (2022) complementam

essa visão ao demonstrar que o controle da velocidade dos motores, por meio de inversores de frequência, não apenas otimiza o fluxo hidráulico, mas também reduz a resistência hidráulica do sistema, melhorando o desempenho geral. Esses achados reforçam a eficácia dessa estratégia para alcançar eficiência operacional e energética.

Na presente pesquisa, a estratégia de implementação dos inversores de frequência nas bombas B2 e B4 foi fundamental para alinhar a operação às variações de demanda de água. A análise do perfil de consumo, associada à caracterização do sistema de bombeamento e suas limitações, permitiu uma operação mais eficiente e sustentável. Os inversores ajustaram a velocidade das bombas de acordo com a demanda horária, reduzindo o consumo energético e os custos operacionais. Além disso, indicadores financeiros foram utilizados para validar o investimento, destacando a viabilidade econômica da solução. Dessa forma, os resultados obtidos corroboram a literatura e reforçam a importância da gestão inteligente na operação de bombas industriais, evidenciando que o uso de tecnologias como inversores de frequência é essencial para alcançar máxima eficiência energética, reduzir desperdícios e otimizar custos.

Além disso, aplicação de técnicas de Estratégias Evolutivas para calibrar o modelo hidráulico no EPANET com dados reais de vazão do sistema. Os resultados mostraram uma otimização na operação ao propor redução dos custos de bombeamento. A modelagem hidráulica replicou as condições reais de operação da fábrica, e a calibração melhorou a confiabilidade do modelo, alinhando-se com as melhores práticas da literatura.

A modelagem hidráulica, utilizando o software EPANET, foi crucial para a simulação e análise dos cenários de demanda e operação das bombas. Os resultados mostraram que a modelagem hidráulica foi capaz de replicar com precisão as condições reais do sistema, conforme evidenciado pela comparação dos dados simulados com os dados reais obtidos da fábrica de vidros, nos resultados da calibração.

O alinhamento entre os resultados da modelagem e as medições reais é consistente com as descobertas de Shiu, Chung e Chiang (2023), que destacam a importância da calibração e validação dos modelos hidráulicos para garantir a precisão das simulações. A modelagem hidráulica permitiu uma avaliação detalhada das vazões e pressões.

A calibração do modelo hidráulico foi uma etapa essencial para garantir que as simulações fossem representativas da realidade, ao comparar o $Q_{original}$, que são as vazões medidas pela fábrica, com as vazões obtidas do algoritmo de EE, ambas em L/s. O uso de estratégias evolutivas para a calibração permitiu ajustar os parâmetros do modelo de forma eficaz, alinhando as previsões do modelo com os dados reais de vazão e pressão. Os resultados obtidos indicam que a calibração contribuiu significativamente para a precisão do modelo, o que é corroborado pela literatura, como Zhao, Wu, Simpson *et al.* (2022) e Zanfei, Maenapace, Santopietro *et al.* (2020), que destacam que a calibração eficaz é fundamental para a confiabilidade dos modelos hidráulicos. A implementação das técnicas de calibração garantiu que o modelo fosse capaz de prever com precisão o comportamento do sistema em diferentes condições de operação.

7 CONCLUSÃO

7 CONCLUSÃO

A presente pesquisa propôs uma abordagem integrada para a otimização do sistema de bombeamento em uma planta industrial de operação intermitente, utilizando modelagem hidráulica no EPANET, estratégias de controle de bombas e análise de viabilidade econômica. Os resultados destacam a importância da integração entre dados reais, metodologias avançadas de modelagem e tecnologias, como inversores de frequência, para alcançar maior eficiência hidroenergética e reduzir os custos operacionais.

A análise dos dados de vazão possibilitou a compreensão detalhada dos padrões de consumo da fábrica, identificando variações sazonais e horários críticos de maior e menor demanda. O estudo aprofundado dos perfis de consumo, especialmente o registrado no mês de março, foi essencial para ajustar o modelo hidráulico e definir estratégias de controle com base nos horários específicos de operação. A modelagem do sistema evidenciou que a alocação inteligente dos horários de operação das bombas, levando em consideração os perfis de consumo e as características individuais de cada equipamento, foi crucial para reduzir o consumo energético e maximizar a eficiência do sistema.

A implementação do controle programado demonstrou a viabilidade de operar a bomba B4 durante os períodos de maior consumo, enquanto a bomba B2 foi priorizada para os períodos de menor demanda, garantindo um uso otimizado dos equipamentos. Além disso, a análise econômica revelou a viabilidade da adoção de inversores de frequência nas bombas B2 e B4. Com um investimento inicial de R\$ 67.260,00, o sistema apresentou um payback de apenas 4 meses, uma TIR de 27,55% e um VPL de R\$ 326.574,95, considerando um horizonte de 24 meses e a taxa Selic de 12,25% ao ano. Esses indicadores reforçam que a modernização do sistema não é apenas eficiente operacionalmente, mas também vantajosa economicamente.

A análise da capacidade diária de geração dos poços demonstrou que a estratégia de agendamento de operação mantém os volumes bombeados dentro de limites seguros, utilizando 30% da capacidade do Poço 2 e 25% da capacidade do Poço 4, garantindo a sustentabilidade do sistema de abastecimento.

Outro aspecto fundamental da otimização abordado no estudo foi a modelagem do setor de água do forno do SAA industrial. O setor que integra o SAA possuía

trechos sem medição, e a modelagem hidráulica foi essencial para estimar dados hidráulicos e identificar os padrões de demanda não mensurados diretamente.

A integração entre EPANET, Python e algoritmos evolutivos proporcionou uma análise detalhada do SAA industrial, permitindo estimativas precisas de vazões e pressões. O erro relativo das vazões foi inferior a 3%, comparando os valores medidos na fábrica (Q_{original}) com os obtidos pelo modelo calibrado com o algoritmo EE. Para as pressões, o erro relativo foi inferior a 1%, considerando os dados de pressão do modelo, obtidos a partir das vazões medidas na fábrica, em relação às pressões calculadas com as vazões calibradas. A calibração dos parâmetros hidráulicos derivados da modelagem permitiu replicar com maior precisão as condições reais do sistema, aumentando a confiabilidade das simulações e acelerando a convergência geracional do algoritmo, otimizando assim a estimativa dos parâmetros hidráulicos. No entanto, o algoritmo evolutivo apresentou limitações na calibração de alguns parâmetros, como os coeficientes de perda de carga, que registraram um erro relativo próximo a 5%, destoando das menores margens de erro obtidas para vazão e pressão.

As contribuições científicas deste estudo incluem a aplicação de técnicas metaheurísticas para aprimorar modelos hidráulicos e a proposta de metodologias adaptáveis a diferentes contextos e setores. Além disso, a pesquisa reforça a importância dos indicadores ESG, promovendo uma gestão mais sustentável e consciente dos recursos hídricos.

O modelo desenvolvido serve como uma referência para futuras pesquisas e práticas industriais, incentivando a inovação e a melhoria contínua na gestão da água. Assim, este trabalho não apenas avança o conhecimento acadêmico na área, mas também oferece soluções práticas para a otimização e eficiência dos sistemas de abastecimento, contribuindo para uma gestão mais sustentável das operações industriais.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Resolução Normativa nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021. Estabelece as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica; revoga as Resoluções Normativas ANEEL nº 414, de 9 de setembro de 2010; nº 470, de 13 de dezembro de 2011; nº 901, de 8 de dezembro de 2020 e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 8 dez. 2021. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.html>. Acesso em: 05 ago, 2024.

Andraka, D.; Kruszynski, W.; Tyniec, J.; Mazur, J. G.; Kazmierczak, B. Practical Aspects of the Energy Efficiency Evaluation of a Water Distribution Network Using Hydrodynamic Modeling—A Case Study. **Energies**, v. 16, n. 8, p. 3340, 2023.

Arenales, M., Armentano, V., Morabito, R. e Yanasse, H. **Pesquisa Operacional**. 2a edição. Rio de Janeiro: Editora Campus/Elsevier, 2015.

Azari, M. D.; Rizi, A. P.; Ashrafzadeh, A. Hydraulic design and operation of variable-speed pumps as the water–energy saving strategies in pressurized irrigation systems. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 23, p. 1493-1508, 2021.

Bi, W; Xu, Y; Wang, H. Comparison of searching behaviour of three evolutionary algorithms applied to water distribution system design optimization. **Water**, v. 12, n. 3, p. 695, 2020.

Bagloee, S. A.; Asadi, M.; Patriksson, M. Minimization of water pumps' electricity usage: A hybrid approach of regression models with optimization. **Expert Systems with Applications**, v. 107, p. 222-242, 2018.

Bordeasu, D.; Prostean, O.; Filip I.; Vasar, C. Adaptive Control Strategy for a Pumping System Using a Variable Frequency Drive. **Machines**, v. 11, n. 7, p. 688, 2023.

Bouach, A.; Benmamar, S. Analysis of different operational control strategies for drinking water pump-tank systems: a case study. **SN Applied Sciences**, v. 1, n. 12, p. 1718, 2019.

Candilejo, A. M.; Santillán, D.; Garrote, L. Pump efficiency analysis for proper energy assessment in optimization of water supply systems. **Water**, v. 12, n. 1, p. 132, 2019.

Cauchick, P. Metodologia Científica para Engenharia. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2019. **E-book**. ISBN 9788595150805. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#!/books/9788595150805/>. Acesso em: 03 atrás. 2024.

Costa, J. dos S.; Junior, L. M. L. de A. Energy efficiency applied to electricity consumption: A bibliographic review study. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 10, n. 4, p. e26210414085, 2021.

- Dai, P. D. Optimal pressure management in water distribution systems using an accurate pressure reducing valve model based complementarity constraints. **Water**, v. 13, n. 6, p. 825, 2021.
- De Souza, D. F.; Da Silva, P. P. F.; Fontanelle, L. F. A.; Barbosa, G. D.; Jesus, M. O. Efficiency, quality, and environmental impacts: A comparative study of residential artificial lighting. **Energy Reports**, v. 5, p. 409-424, 2019.
- Diniz, A. M. F.; Fontes, C. H. O.; Costa, C. A.; Costa, G. M. G. Dynamic modeling and simulation of a water supply system with applications for improving energy efficiency. **Energy Efficiency**, v. 8, p. 417-432, 2015.
- Egito, T. B.; De Azevedo, J. R. G.; Bezerra, S. de T. M. Optimization Of The Operation Of Pumping Systems And Reservoirs Of Water Distribution Systems With Emphasis In Energy Efficiency. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica**, p. 1337-1353, 2022.
- Galuppini, G.; Creaco, E.; Toffanin, C.; Magni, L. Service pressure regulation in water distribution networks. **Control Engineering Practice**, v. 86, p. 70-84, 2019.
- Gan, X.; Pei, J.; Pavesi, G.; Yuan, S.; Wang, W. Application of intelligent methods in energy efficiency enhancement of pump system: A review. **Energy Reports**, v. 8, p. 11592-11606, 2022.
- Gao, T. Roughness and demand estimation in water distribution networks using head loss adjustment. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 143, n. 12, p. 04017070, 2017.
- Gao, T. Pipe roughness estimation in water distribution networks using head loss adjustment. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 143, n. 5, p. 04017007, 2017.
- Gomes, H. P. Abastecimento de Água. 2ª Edição, **LENHS/ UFPB**, 2021.
- Hossain, S.; Hewa, G. A.; Chow, C. W. K.; Cook, D. Modelling and incorporating the variable demand patterns to the calibration of water distribution system hydraulic model. **Water**, v. 13, n. 20, p. 2890, 2021.
- Ivanova, V. R.; Ivanov, I. Yu. **Efficiency of introduction of variable frequency drive**. In: 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). IEEE, 2020. p. 1-7.
- Kikomeko, S.; Sempewo, J. Development of optimal pump schedules for improved energy efficiency in water supply systems (case of NWSC). **International Journal of Biological and Chemical Sciences**, v. 15, n. 7, p. 23-34, 2021.
- Kurian, V.; Chinnusamy, S.; Natarajan, A.; Narasimhan, S.; Narasimhan, S. Optimal operation of water distribution networks with intermediate storage facilities. **Computers & Chemical Engineering**, v. 119, p. 215-227, 2018.

- Jahandideh-Tehrani, M.; Bozorg-Haddad, O.; Loáiciga, H. A. A review of applications of animal-inspired evolutionary algorithms in reservoir operation modelling. **Water and Environment Journal**, v. 35, n. 2, p. 628-646, 2021.
- Janga, M. R.; Nagesh, D. K. Evolutionary algorithms, swarm intelligence methods, and their applications in water resources engineering: a state-of-the-art review. **H2 Open Journal**, v. 3, n. 1, p. 135-188, 2020.
- Kapanski, A.; Hruntovich, N.; Bakhur, S.; Markaryants, L.; Dolomanyak, L. Optimize the cost of paying for electricity in the water supply system by using accumulating tanks. In: E3S Web of Conferences. **EDP Sciences**, 2020. p. 01065.
- Kapp, S.; Wang, C.; McNelly, M.; Romeiko, X.; Choi, J-K. A comprehensive analysis of the energy, economic, and environmental impacts of industrial variable frequency drives. **Journal of Cleaner Production**, v. 434, p. 140474, 2024.
- Lavrič, H.; Drobnič, K.; Fišer, R. Model-Based Assessment of Energy Efficiency in Industrial Pump Systems: A Case Study Approach. **Applied Sciences**, v. 14, n. 22, p. 10430, 2024.
- Li, T-T.; Wang, K.; Sueyoshi, T.; Wang, D. D. ESG: Research progress and future prospects. **Sustainability**, v. 13, n. 21, p. 11663, 2021.
- Limbong, B.; Suripin, S.; Sudarnoutaomo, S. EPANET Model Clean Water Network Callibration Using Modified Roughness C Number Hazen William Method. **Jurnal Pensil: Pendidikan Teknik Sipil**, v. 11, n. 2, p. 171-185, 2022.
- 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.
- Luo, Y.; Xiong, Z.; Sun, H.; Guo, Y. Research on energy-saving operation control model of the multi-type configuration centrifugal pump system with single invert. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 9, n. 7, p. 1687814017707650, 2017.
- Klise, K. A.; Hart, D.; Moriarty, D. Water network tool for resilience (WNTR) user manual. **Sandia National Lab. (SNL-NM)**, Albuquerque, NM (United States), 2017.
- Marchi, A.; Simpson, A. R.; Lambert, M. F. Pump operation optimization using rule-based controls. **Procedia Engineering**, v. 186, p. 210-217, 2017.
- Maskit, M; Ostfeld, A. Multi-objective operation-leakage optimization and calibration of water distribution systems. **Water**, v. 13, n. 11, p. 1606, 2021.
- Menke, R.; Abraham, E.; Stoianov, I. Modeling variable speed pumps for optimal pump scheduling. In: **World Environmental and Water Resources Congress 2016**. 2016. p. 199-209.

Miller, D. M.; Trifunovic, N.; Kennedy, M.; Kapelan, Z. Optimisation of pumping and storage design through iterative hydraulic adjustment for minimum energy consumption. **Urban Water Journal**, v. 21, n. 1, p. 113-130, 2024.

Mohammad, A. S.; Bozorg; H. O.; Loáiciga, H. A. State-of-art of genetic programming applications in water-resources systems analysis. **Environmental monitoring and assessment**, v. 192, p. 1-17, 2020.

Niazkar, M.; Talebbeydokhti, N.; Afzali, S. H. Novel grain and form roughness estimator scheme incorporating artificial intelligence models. **Water resources management**, v. 33, p. 757-773, 2019.

Neoenergia Pernambuco. Tabela de tarifas de energia elétrica. Resolução Homologatória nº 3.195, de 09 de maio de 2023. Vigência: 14/05/2023 a 28/04/2024. Disponível em: <https://servicos.neoenergiapernambuco.com.br>. Acesso em: [28 de março de 2024]. PDF.

Nikolenko, I. V.; Ryzhakov, A. N. Operation mode optimization of centrifugal pumps of a water supply system booster pumping station with a reserve tank. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. **IOP Publishing**, 2020. p. 012007.

Parvaze, S.; Kumar, R.; Khan, J. N.; Al-Ansari, N.; Parvaze, S.; Vishwakarma, D. K. et al. Optimization of water distribution systems using genetic algorithms: A review. **Archives of Computational Methods in Engineering**, v. 30, n. 7, p. 4209-4244, 2023.

Pordal, A.; Noshadi, M.; Masoudi, M. H. Analysis of Drinking Water Distribution Network Using EPANET Model (Case Study: Part of Shiraz Water Distribution Network). **Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering**, v. 47, n. 3, p. 1791-1799, 2023

Raja V. G.; Satish, K B.; Upendra, P.; Ravi, T. K.; Vijayakumar, A. Literature Review–Design of Water Distribution Network. **Journal of Water Resource Research and Development**, v. 4, n. 3. p. 1-5, 2021.

Reis, A. L.; Lopes, M. A. R.; Campos, A. A.; Antunes, C. H. A review of operational control strategies in water supply systems for energy and cost efficiency. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 175, p. 113140, 2023.

Santos, I. R.; Estrada, F. R. L; Puig, V.; Palomo, G. V. Simultaneous optimal estimation of roughness and minor loss coefficients in a pipeline. **Mathematical and Computational Applications**, v. 25, n. 3, p. 56, 2020

Salomons, E.; Housh, M. **Practical real-time optimization for energy efficient water distribution systems operation**. Journal of Cleaner Production, v. 275, p. 124148, 2020.

Serafeim, A. V.; Perdios, A.; Fourniotis, N. T.; Langouusis, A. Towards More Efficient Hydraulic Modeling of Water Distribution Networks Using the EPANET Software Engine. **Environmental Sciences Proceedings**, v. 25, n. 1, p. 46, 2023.

Shiu, C-C.; Chung, C.-C.; Chiang, T. Enhancing the EPANET hydraulic model through genetic algorithm optimization of pipe roughness coefficients. **Water Resources Management**, v. 38, n. 1, p. 323-341, 2023.

Tahiri, A; Che, D; Ladeveze, D; Chiron, P; Archimède, B. Network flow and flood routing model for water resources optimization. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 3937, 2022

Tao, Y; Yan, D; Yang, H; Ma, L; Kou, C. Multi-objective optimization of water distribution networks based on non-dominated sequencing genetic algorithm. **Plos one**, v. 17, n. 11, p. e0277954, 2022.

Torregrossa, D.; Capitanescu, F. Optimization models to save energy and enlarge the operational life of water pumping systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 213, p. 89-98, 2019.

Zhao, Q; Wu, W; Simpson, A. R; Willis, A. Simpler is better—Calibration of pipe roughness in water distribution systems. **Water**, v. 14, n. 20, p. 3276, 2022.

Zhang, Q.; Zheng, F.; Duan, H. F.; Jia, Y.; Zhang, T.; Guo, X. Efficient numerical approach for simultaneous calibration of pipe roughness coefficients and nodal demands for water distribution systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 144, n. 10, p. 04018063, 2018

Zhou, Y.; Mui, K. W.; Wong, L. T. Evaluation of design flow rate of water supply systems with low flow showering appliances. **Water**, v. 11, n. 1, p. 100, 2019.