



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFRAESTRUTURA E
DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO

INGRID LUNA BAIA VIANA

**PROTÓTIPO PARA ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DE BOMBAS FUNCIONANDO COMO
TURBINAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

Tucuruí
2025

INGRID LUNA BAIA VIANA

**PROTÓTIPO PARA ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DE BOMBAS
FUNCIONANDO COMO TURBINAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. Área de concentração: Tecnologias Sustentáveis.

Orientador: Dr. Júnior Hiroyuki Ishihara
Coorientador: Dr. Davi Edson Sales e Souza

Tucuruí
2025

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)**

B152p Baia Viana, Ingrid Luna.
Protótipo para análise técnica-econômica de bombas que
funcionam como turbinas em redes de distribuição de água /
Ingrid Luna Baia Viana. — 2025.
50 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Júnior Hiroyuki Ishihara
Coorientador(a): Prof. Dr. Davi Edson Sales E Souza
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Tucuruí, 2025.

1. TOPSIS. 2. Python. 3. Angular. 4. Multicritério. I.
Título.

CDD 621.042

INGRID LUNA BAIA VIANA

**PROTÓTIPO PARA ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DE BOMBAS
FUNCIONANDO COMO TURBINAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. Área de concentração: Tecnologias Sustentáveis.

Orientador: Dr. Júnior Hiroyuki Ishihara
Co-Orientador: Dr. Davi Edson Sales e Souza

Aprovada em 27 de fevereiro de 2025.

BANCA EXAMINADORA:



Dr. Júnior Hiroyuki Ishihara / UFPA – Orientador

Documento assinado digitalmente
 **DAVI EDSON SALES E SOUZA**
Data: 25/03/2025 17:36:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Davi Edson Sales e Souza / UFPA - Coorientador

Documento assinado digitalmente
 **JESSE LUIS PADILHA**
Data: 27/03/2025 13:15:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Jessé Luís Padilha / UFPA - Interno

Documento assinado digitalmente
 **SAULO DE TARSO MARQUES BEZERRA**
Data: 26/03/2025 10:20:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra / UFPE - Externo

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, cuja graça e força me sustentaram ao longo desta jornada, permitindo-me superar desafios e alcançar esse importante marco na minha vida acadêmica.

À minha família, minha base inabalável, que sempre me incentivou com amor, paciência e apoio incondicional. Cada conquista minha é também de vocês.

Aos meus amigos, tanto os antigos quanto os que fiz ao longo do mestrado, que compartilharam comigo alegrias, desafios e momentos inesquecíveis. A amizade e o apoio de cada um foram fundamentais para que eu conseguisse seguir em frente.

Sou imensamente grata ao professor Dr. Júnior Hiroyuki Ishihara, meu orientador, e ao professor Dr. Davi Edson Sales e Souza, meu coorientador, que me acompanharam com dedicação, compartilhando conhecimento, incentivo e inspiração. São profissionais exemplares e um modelo que almejo seguir na carreira docente.

À banca examinadora, minha sincera gratidão pelas contribuições enriquecedoras para este trabalho. À Universidade Federal do Pará (UFPA) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, por proporcionarem o ambiente acadêmico e os recursos necessários para a realização desta pesquisa. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro por meio da bolsa de estudos, essencial para o desenvolvimento do projeto.

Por fim, reconheço que esta trajetória não foi percorrida sozinha. O caminho turbulento do mestrado só pôde ser trilhado com o suporte profissional, familiar e a amizade que me foram oferecidos. A todos que contribuíram, direta ou indiretamente, minha eterna gratidão.

Parafraseando Newton, se enxerguei mais longe, foi por estar sobre os ombros de gigantes.

Epígrafe

“Onde a água encontra a máquina,
a força invisível se torna trabalho, e o
trabalho, progresso”.

Princípios de Engenharia

Hidráulica

RESUMO

A crescente necessidade por soluções sustentáveis nas redes de distribuição de água exige tecnologias que otimizem a eficiência energética e reduzam custos operacionais. No entanto, a escolha da melhor alternativa para implementação de Bombas Funcionando como Turbinas (BFTs) é um desafio devido à multiplicidade de critérios técnicos e econômicos envolvidos. Assim, este estudo propõe um modelo de suporte à decisão, empregando técnicas multicritério e programação computacional para auxiliar na seleção da alternativa mais viável dentro de cenários distintos. A análise concentra-se na viabilidade técnico-econômica de BFTs em Redes de Distribuição de Água (RDAs), utilizando o método TOPSIS, onde os dados serão avaliados e classificados por similaridade com condições ideais. Implementado em linguagem Python, o sistema garante precisão aos cálculos, com uma interface gráfica denominada de FliessEnergy, hospedado na Vercel, com um layout responsivo e escalável, proporcionando uma experiência otimizada ao usuário. A aplicação prática com dados de RDAs reais demonstrou sua eficácia na priorização das alternativas mais vantajosas. Os resultados indicaram que o Cenário 1 apresentou a melhor configuração para implementação de BFTs, enquanto o Cenário 5 se mostrou a alternativa menos favorável. Esta classificação das alternativas ajuda os gestores a tomar decisões, levando em conta tanto a proximidade com as melhores condições quanto a distância das piores. Para avaliar a confiabilidade e consistência dos códigos, empregou-se o PyTOPS, um software livre que possibilita várias simulações com alterações nos pesos dos critérios. Foram feitas 500 simulações, resultando em uma variabilidade reduzida entre os cenários, o que reforça a solidez do modelo e sua habilidade de gerar classificações consistentes mesmo com pequenas mudanças nos parâmetros. O modelo mostrou-se consistente e confiável, oferecendo um instrumento útil para avaliar a implementação de BFTs em RDAs. Espera-se que, com aprimoramentos futuros e integração de bases de dados, esta solução possa contribuir de maneira significativa para decisões estratégicas no setor de saneamento do Brasil.

Palavras-chave: TOPSIS; Python; Angular; Multicritério.

ABSTRACT

The growing need for sustainable solutions in water distribution networks requires technologies that optimize energy efficiency and reduce operating costs. However, choosing the best alternative for implementing Pumps Operating as Turbines (BFTs) is challenging due to the multiple technical and economic criteria involved. Therefore, this study proposes a decision support model, employing multicriteria techniques and computer programming to assist in selecting the most viable alternative within different scenarios. The analysis focuses on the technical-economic feasibility of BFTs in Water Distribution Networks (RDAs), using the TOPSIS method, where data will be evaluated and classified by similarity to ideal conditions. Implemented in Python, the system ensures calculation accuracy, with a graphical interface called *FliessEnergy*, hosted by Vercel, with a responsive and scalable layout, providing an optimized user experience. Practical application with real RDA data demonstrated its effectiveness in prioritizing the most advantageous alternatives. The results indicated that Scenario 1 presented the best configuration for implementing BFTs, while Scenario 5 was the least favorable alternative. This classification of alternatives helps managers make decisions, taking into account both the proximity to the best conditions and the distance from the worst. To assess the reliability and consistency of the codes, *PyTOPS*, free software that allows several simulations with changes in the weights of the criteria, was used. A total of 500 simulations were performed, resulting in reduced variability between the scenarios, which reinforces the robustness of the model and its ability to generate consistent classifications even with small changes in the parameters. The model proved consistent and reliable, offering a useful instrument for evaluating the implementation of BFTs in RDAs. It is expected that, with future improvements and integration of databases, this solution can contribute significantly to strategic decisions in the sanitation sector in Brazil.

Keywords: TOPSIS; Python; Angular; Multicriteria.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
2	OBJETIVOS	11
2.1	Objetivo geral	11
2.2	Objetivos específicos	11
3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	12
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
4.1	Sistemas de abastecimento de água	13
4.2	Eficiência energética em redes de distribuição de água.....	14
4.3	Bombas Funcionando como Turbinas (BFTs)	16
4.4	Análise técnico-econômica.....	19
4.5	Método Multicritério (TOPSIS).....	21
5	ARTIGO 1	24
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	33
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34
	ANEXO I - CÓDIGO TOPSIS.....	41
	ANEXO II - SÍNTESE DE CÓDIGOS DA INTERFACE DE USUÁRIO.....	44

1 INTRODUÇÃO

As redes de distribuição de água (RDAs) desempenham um papel crucial no fornecimento de água potável, garantindo quantidade, qualidade e pressão adequadas aos consumidores finais. No entanto, esses sistemas complexos frequentemente enfrentam problemas relacionados ao desperdício de água e energia, devido ao excesso de pressão em determinados horários ou regiões (Spedaletti et al., 2021; Egito, Azevedo e Bezerra, 2023). Esses desafios resultam em vazamentos, rompimentos, perda de qualidade da água e insatisfação dos usuários (e Souza et al., 2023).

Adicionalmente, as RDAs precisam melhorar a eficiência operacional, reduzir desperdícios e promover a sustentabilidade ambiental (Barton et al., 2022). O excesso de pressão em redes de abastecimento, além de gerar perdas hídricas, aumenta o consumo energético nas estações de bombeamento, eleva os custos operacionais e contribui para as emissões de gases de efeito estufa (GEE) (Stefanizzi et al., 2020).

Tradicionalmente, a solução para mitigar o excesso de pressão na rede, são as válvulas redutoras de pressão (VRPs), dispositivos que ajustam a pressão de saída conforme a demanda. Contudo, essas válvulas dissipam energia excedente, requerem manutenção frequente e possuem baixa adaptabilidade às mudanças operacionais (Pugliese et al., 2018). Como alternativa, surgem as bombas funcionando como turbinas (BFTs), que utilizam bombas centrífugas convencionais operando de forma inversa para converter o excesso de pressão em energia elétrica (Carravetta et al., 2018).

Estudos recentes destacam o potencial das BFTs na substituição de VRPs, principalmente pela possibilidade de recuperação energética (Souza et al., 2021; Stefanizzi et al., 2020) sendo uma boa estratégia sustentável, alinhada às metas globais de redução de emissões de GEE (Mutikanga et al., 2011). As BFTs oferecem vantagens significativas, incluindo redução do consumo energético nas estações de bombeamento, diminuição das emissões de GEE, baixo custo de implantação e manutenção, com maior flexibilidade para atender às demandas variáveis (e Souza et al., 2023).

Todavia, a adoção de BFTs exige uma análise técnico-econômica abrangente que considere aspectos hidráulicos, energéticos, financeiros e ambientais, além de

critérios como vazão, queda de pressão, eficiência, custo e impacto ambiental. Essa análise também deve avaliar a viabilidade econômica, levando em conta os custos de implantação, operação e manutenção, bem como os benefícios relacionados à economia ou geração de energia (Fecarotta e McNabola, 2017).

A variabilidade de pressão e demanda em sistemas reais torna indispensável o uso de métodos de simulação hidráulica e energética para avaliar o desempenho das BFTs (Marchiori et al., 2019; e Souza et al., 2023). Apesar dos avanços na literatura, a falta de modelos computacionais para otimização da análise técnico-econômica ainda limita a capacidade dos gestores em avaliar alternativas e tomar decisões informadas. Esses modelos são essenciais para integrar evidências e equilibrar critérios técnicos, econômicos e de sustentabilidade.

Entre as abordagens metodológicas, destaca-se o uso de métodos multicritério, como a Técnica de Ordenação por Preferência pela Similaridade ao Ideal (TOPSIS), que tem se mostrado eficaz na avaliação de vulnerabilidades e alternativas para controle de pressão em RDAs (Tornyeviadzi et al., 2021; Černevičienė e Kabašinskas, 2022), podendo analisar dados densos e variados com bons resultados.

Neste trabalho, será desenvolvido um modelo computacional para suporte à decisão, empregando o método multicritério TOPSIS, implementado na linguagem Python. A escolha do Python é motivada por sua ampla aceitação na comunidade acadêmica, sua rica biblioteca de ferramentas especializadas e sua flexibilidade no desenvolvimento de modelos interativos e escaláveis. A combinação do método TOPSIS com Python possibilita uma análise eficiente e precisa, integrando critérios técnicos, econômicos e ambientais.

Essa integração é essencial para fornecer uma ferramenta prática e consistente que atenda às necessidades de gestores e engenheiros na avaliação de projetos envolvendo BFTs. Além disso, a pesquisa contribui para a agenda global de sustentabilidade e energias renováveis, propondo uma solução viável e eficiente para a geração de energia em RDAs. Os benefícios esperados incluem a redução dos custos operacionais, diminuição das perdas de água e energia, mitigação das emissões de GEE e melhoria da qualidade do serviço prestado aos consumidores.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Desenvolver um protótipo computacional para suporte à decisão, integrando o método TOPSIS em Python, para análise técnico-econômica da substituição de Válvulas Redutoras de Pressão (VRPs) por Bombas Funcionando como Turbinas (BFTs) em Redes de Distribuição de Água (RDAs).

2.2 Objetivos específicos

- Implementar o método TOPSIS em Python, integrando algoritmos para melhorar a análise de dados;
- Avaliar os resultados do modelo e a sua aplicabilidade prática;
- Desenvolver uma interface gráfica intuitiva;

3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho adota o formato de artigo científico, em conformidade com as normas do Programa de Pós-Graduação em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético (PPGINDE). Nesse modelo de defesa, o aluno apresenta o artigo submetido a um periódico na íntegra, precedido pelos elementos textuais: introdução, objetivos, estrutura e revisão bibliográfica. Após a apresentação do artigo, incluem-se as considerações finais e as referências bibliográficas.

O Capítulo 1 introduz a problemática do estudo, justifica a relevância do tema e apresenta, de forma concisa, trabalhos relevantes na mesma área, destacando o estado da arte. Na sequência, os objetivos da pesquisa são delineados no Capítulo 2. O Capítulo 3 orienta o leitor, descrevendo a estrutura do trabalho e detalhando as particularidades de cada capítulo.

O Capítulo 4 é dedicado à revisão bibliográfica, abordando conceitos fundamentais relacionados ao sistema de abastecimento de água, à recuperação de energia em redes de distribuição por meio de bombas funcionando como turbinas (BFTs) e à aplicação de métodos multicritério. O Capítulo 5 apresenta o artigo científico, elaborado conforme as diretrizes do periódico selecionado. Por fim, o trabalho é concluído com as considerações finais e as referências bibliográficas, consolidando as contribuições e implicações do estudo.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Sistemas de abastecimento de água

Os sistemas de abastecimento de água (SAA) são fundamentais para fornecer acesso contínuo a água potável, desde a captação em fontes naturais até o tratamento, armazenamento e distribuição, garantindo assim a qualidade do recurso hídrico; o gerenciamento eficiente desses sistemas é crucial para atender à demanda crescente e preservar a integridade da infraestrutura hídrica (Dogani et al., 2020).

O tratamento da água visa atender aos padrões de potabilidade e garantir a segurança do consumo humano (Geldreich, 2020). Tecnologias avançadas são frequentemente empregadas nessa fase para assegurar a eficiência e conformidade com as normativas ambientais e de saúde (Dogani et al., 2020).

Após o tratamento, a água tratada é direcionada para a etapa de armazenamento, onde reservatórios e tanques são utilizados para garantir a disponibilidade contínua do recurso. O armazenamento estratégico é essencial para atender à demanda variável ao longo do tempo e para fornecer uma reserva estratégica em situações de emergência ou manutenção da rede (Howe et al., 2018).

A etapa de transporte constitui outra fase crítica, envolvendo o deslocamento da água tratada dos pontos de armazenamento até os consumidores finais por meio de uma intrincada rede de tubulações e canalizações. O transporte eficiente demanda o dimensionamento adequado da infraestrutura, considerando a distância, a topografia e a demanda específica de cada região atendida (Morani et al., 2021).

Cada uma dessas etapas é interdependente e exige cuidados específicos para garantir a eficiência operacional e a qualidade da água fornecida. As Redes de Distribuição de Água (RDAs), com ênfase nas Válvulas Redutoras de Pressão (VRPs), desempenham um papel crucial na fase de transporte, regulando a pressão e contribuindo para a integridade da rede (Fontana et al., 2018). Portanto, a compreensão holística dessas diferentes etapas é essencial para o gerenciamento eficiente dos sistemas de abastecimento de água.

Nesse contexto, RDAs desempenham um papel central na entrega contínua de água potável aos consumidores. Elas representam a fase final do sistema, sendo responsáveis pela distribuição do recurso tratado até os pontos de consumo. A

eficácia dessas redes não apenas depende da sua concepção e dimensionamento adequados, mas também da capacidade de lidar com desafios operacionais, como a regulação da pressão da água (Butera et al., 2021).

As VRPs emergem como componentes-chave no contexto das RDAs, desempenhando um papel crucial na regulação da pressão da água ao longo da rede de distribuição. Segundo Fontana et al. (2018), as VRPs são instrumentos fundamentais para manter a integridade da infraestrutura, evitando variações excessivas de pressão que podem levar a vazamentos e rupturas na rede. Esses dispositivos contribuem significativamente para o controle operacional e a eficiência do sistema como um todo.

A operação eficiente das VRPs não apenas assegura a integridade da rede de distribuição, mas também desempenha um papel crucial na garantia da qualidade da água fornecida aos consumidores. A regulação adequada da pressão contribui para evitar contaminações e perdas físicas no sistema, otimizando assim a entrega de água potável (Gupta et al., 2020). Além disso, a implementação estratégica de VRPs é fundamental para minimizar as perdas por vazamentos, promovendo a sustentabilidade operacional do sistema (Cao et al., 2019).

Logo, os sistemas de abastecimento de água, desde a captação até a distribuição, demandam uma abordagem integrada para garantir a eficiência operacional e a entrega de água potável de qualidade. As RDAs, com ênfase nas VRPs, desempenham um papel crucial nesse cenário, contribuindo para a regulação da pressão e manutenção da integridade da rede de distribuição (Fontana et al., 2018). A compreensão aprofundada desses componentes é essencial para enfrentar os desafios contemporâneos e promover a sustentabilidade dos sistemas de abastecimento de água (Butera et al., 2021).

4.2 Eficiência energética em redes de distribuição de água

A busca pela eficiência energética em Redes de RDAs é essencial para promover a sustentabilidade operacional e econômica desses sistemas, especialmente em contratos de concessão de longo prazo (Stefanizzi et al., 2019). Estratégias e tecnologias inovadoras podem ser empregadas para otimizar o uso de

energia em sistemas de bombeamento e reduzir as perdas de energia nas redes, contribuindo para a eficiência global do sistema (Gupta et al., 2020).

Uma das principais áreas de foco para melhorar a eficiência energética em RDAs é o sistema de bombeamento. A otimização do funcionamento dos equipamentos de bombeamento é crucial, uma vez que o consumo de energia associado a esses sistemas é significativo. A implementação de controles avançados, como a utilização de algoritmos de otimização para ajustar a velocidade das bombas de acordo com a demanda real, pode resultar em consideráveis economias de energia (Luna et al., 2019). Além disso, a seleção criteriosa de bombas eficientes e o monitoramento em tempo real do desempenho contribuem para o uso mais eficiente da energia nos processos de bombeamento (Oikonomou e Parvania, 2018).

Outra estratégia crucial para aprimorar a eficiência energética é a redução de perdas de energia nas redes de distribuição. Vazamentos em tubulações e outros pontos de distribuição representam não apenas uma perda de água, mas também uma perda significativa de energia associada ao processo de bombeamento (Luna et al., 2019). A implementação de tecnologias de detecção avançada de vazamentos, como o uso de sensores e sistemas de monitoramento em tempo real, pode contribuir para a identificação rápida e reparo eficiente de vazamentos, minimizando as perdas de energia associadas (Gupta et al., 2020).

Em contratos de concessão de longo prazo, é crucial estabelecer metas claras de eficiência energética e incentivar a adoção de práticas sustentáveis por parte das concessionárias. Isso pode incluir a implementação de programas de treinamento para operadores e gestores, visando a conscientização sobre a importância da eficiência energética e a utilização de tecnologias inovadoras (Vakilifard et al., 2018). A introdução de políticas que recompensem práticas sustentáveis e eficientes em termos energéticos também pode ser considerada como parte integrante dos contratos de concessão (Oikonomou e Parvania, 2018).

Os contratos de concessão de longo prazo, amplamente utilizados no Brasil e em diversos países, desempenham um papel crucial na moldagem das decisões estratégicas das concessionárias de RDAs, pois estabelecem diretrizes e metas para a operação e manutenção dos sistemas, podem exercer uma influência significativa nas decisões relacionadas à eficiência energética, com impactos tanto no âmbito econômico quanto ambiental (Gupta et al., 2020).

A inclusão de cláusulas específicas sobre eficiência energética nos contratos de concessão proporciona um incentivo direto para que as concessionárias adotem práticas mais sustentáveis. Metas claras e mensuráveis relacionadas à redução do consumo de energia, por exemplo, podem ser estabelecidas, incentivando as empresas a implementarem tecnologias e estratégias voltadas para a eficiência (Stefanizzi et al., 2019).

A redução do consumo de energia em RDAs, quando impulsionada por contratos de concessão de longo prazo, apresenta benefícios econômicos significativos. A eficiência energética não apenas reduz os custos operacionais associados ao bombeamento e distribuição de água, mas também pode resultar em ganhos financeiros substanciais a longo prazo (Vakilifard et al., 2018). A implementação de práticas sustentáveis e a adoção de tecnologias eficientes podem levar a economias de custos operacionais, otimização do uso de recursos e, conseqüentemente, uma gestão financeira mais eficaz para as concessionárias (Oikonomou e Parvania, 2018).

Além dos benefícios econômicos, a redução do consumo de energia tem impactos ambientais positivos. A diminuição da pegada de carbono associada à operação de sistemas de distribuição de água contribui para a mitigação das mudanças climáticas e promove a sustentabilidade ambiental (Luna et al., 2019). A implementação de práticas eficientes em termos energéticos alinha as RDAs com metas e regulamentações ambientais, fortalecendo sua posição como agentes responsáveis no contexto da gestão dos recursos hídricos (Vakilifard et al., 2018).

A eficiência energética em RDAs pode influenciar positivamente a reputação das concessionárias, resultando em uma imagem mais favorável perante a comunidade e os órgãos reguladores (Luna et al., 2019). Ações que demonstram comprometimento com a sustentabilidade e a responsabilidade ambiental podem gerar confiança e apoio público, aspectos cada vez mais relevantes em um contexto em que a conscientização ambiental e as expectativas da sociedade estão em ascensão (Gupta et al., 2020).

4.3 Bombas Funcionando como Turbinas (BFTs)

As BFTs representam uma abordagem inovadora e eficiente na geração de energia em RDAs. O conceito fundamental das BFTs é adaptar bombas convencionais para operar como turbinas, convertendo a energia excedente da água em eletricidade, ao invés de consumi-la para o transporte da água (Carravetta et al., 2018). Esse fenômeno ocorre devido à similaridade construtiva entre bombas e turbinas, permitindo que as bombas sejam ajustadas para operar no sentido inverso, aproveitando a energia cinética da água para gerar eletricidade (Stefanizzi et al., 2020).

Durante sua operação, as BFTs convertem a pressão excessiva da água em energia mecânica, que é então transformada em eletricidade, oferecendo uma solução eficiente em RDAs, onde a pressão da água pode ser aproveitada para gerar energia de forma sustentável (Alberizzi et al., 2019). A utilização de BFTs em RDAs oferece benefícios significativos, não só gerando energia a partir de recursos existentes, mas também ajudando na regulação da pressão da água (Carravetta et al., 2018). Essas turbinas são eficazes no controle da pressão, evitando variações excessivas que poderiam danificar a infraestrutura ou aumentar as perdas por vazamentos (Stefanizzi et al., 2019).

A aplicação das BFTs em RDAs requer uma análise cuidadosa das condições hidráulicas de cada localidade, considerando fatores como a topografia, o perfil de demanda e a variação da pressão da água. Estratégias de controle avançadas podem ser implementadas para otimizar o desempenho das BFTs, maximizando a eficiência na conversão de energia e garantindo uma operação integrada e eficaz (Carravetta et al., 2018).

Nas BFTs, o funcionamento reverso é possível devido à similaridade construtiva com as turbinas. Uma bomba convencional consiste em um rotor conectado a um eixo acionado por um motor, que eleva a pressão da água, movendo-a em uma direção específica (Vakilifard et al., 2018). Nas BFTs, esse processo é revertido: a água flui no sentido oposto, movendo-se através da bomba, e a pressão elevada é convertida em energia mecânica, que, por sua vez, pode ser transformada em energia elétrica por meio de um gerador (Stefanizzi et al., 2020; Viana et al., 2023).

Quando implementadas em RDAs, as BFTs têm o potencial de regular a pressão da água de maneira eficiente. Em situações de pressão excessiva na rede, em vez de dissipar essa energia através de válvulas redutoras de pressão

convencionais, as BFTs podem ser utilizadas para aproveitar essa pressão e gerar eletricidade. Ao converter a pressão da água em energia elétrica, as BFTs reduzem a pressão nas tubulações, minimizando o risco de danos à infraestrutura e contribuindo para a eficiência operacional (Stefanizzi et al., 2019).

A aplicação estratégica de BFTs não só possibilita a geração de energia, mas também previne perdas de energia associadas à redução da pressão. Tradicionalmente, válvulas redutoras de pressão dissipam a energia excessiva em forma de calor, representando um desperdício significativo (Carravetta et al., 2018). Com as BFTs, essa energia é aproveitada para gerar eletricidade, proporcionando benefícios ambientais e econômicos. Além disso, a redução da pressão nas RDAs contribui para a minimização de vazamentos, que frequentemente ocorrem devido à pressão excessiva, gerando danos nas tubulações e vazamentos não detectados (Carravetta et al., 2018).

A operação reversa das BFTs, ao converter a pressão da água em energia elétrica, destaca-se como uma solução inovadora para o gerenciamento eficiente da pressão em RDAs (Viana et al., 2023). Essa abordagem não só reduz o desperdício de energia, mas também melhora a eficiência operacional e contribui para a sustentabilidade dos sistemas de distribuição de água. A implementação estratégica dessas turbinas não só gera eletricidade renovável, mas também aprimora a gestão da pressão, minimizando perdas e otimizando a eficiência do sistema como um todo (Alberizzi et al., 2019).

Diversos estudos têm avaliado a eficiência das BFTs para o controle de pressão e geração de energia em RDAs. Kandi et al. (2021) e Souza et al. (2023) utilizaram algoritmos de otimização para selecionar BFTs com velocidades constantes e variáveis, demonstrando melhorias significativas no controle de pressão e geração de energia, especialmente em momentos de alto consumo. Patelis, Kanakoudis e Gonelas (2016) observaram que as BFTs controlaram a pressão de maneira similar às válvulas redutoras de pressão, com a vantagem extra de gerar energia. Lydon, Coughlan e Mcnabola (2017) também realizaram um estudo de caso em uma WDN e mostraram que até 40% do potencial bruto de potência de uma VRP existente poderia ser convertido em energia elétrica usando uma BFT, ao mesmo tempo em que controlava a pressão.

Além de testes experimentais e estudos de caso, muitos trabalhos realizaram estudos numéricos para prever o desempenho das BFTs. Renzi, Nigro e Rossi (2020) desenvolveram um modelo polinomial de segunda ordem para prever a eficiência das BFTs. A capacidade de previsão do modelo foi comparada a outros quatro modelos disponíveis na literatura, e os resultados indicaram uma boa acurácia na previsão.

4.4 Análise técnico-econômica

A análise técnico-econômica das BFTs em RDAs exige a aplicação de métodos rigorosos para avaliar tanto o desempenho técnico quanto os impactos econômicos. No contexto das empresas de água no Brasil, é fundamental considerar os contratos de longo prazo, pois estes têm uma influência direta nos aspectos econômicos do projeto (Gupta et al., 2020).

Essa análise pode ser fundamentada em diversos critérios financeiros, como o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR), que são indicadores essenciais para avaliar a viabilidade de projetos de infraestrutura (Dogani et al., 2020). Esses métodos fornecem informações sobre o retorno financeiro ao longo do tempo, possibilitando a comparação entre diferentes alternativas. A consideração dos custos operacionais e de manutenção também é crucial para uma avaliação abrangente (Stefanizzi et al., 2019).

Além disso, a análise destaca a importância de considerar os contratos de longo prazo, uma prática comum nas empresas de água no Brasil. Esses contratos influenciam as decisões de investimento, pois afetam diretamente o fluxo de caixa ao longo do tempo. A abordagem de longo prazo exige uma visão holística dos benefícios e custos durante o ciclo de vida do projeto, levando em conta as mudanças nas condições de mercado e as variações na demanda de água ao longo do tempo (Howe et al., 2018).

Para avaliar as BFTs nas RDAs, os parâmetros técnicos fundamentais incluem a eficiência hidráulica, o comportamento operacional, e as variações de pressão e vazão na rede, incluindo perdas (Viana et al., 2023). A eficiência hidráulica é um critério essencial, pois reflete a capacidade das BFTs de converter a pressão da água em energia elétrica de forma eficiente, além de regular a pressão da água de maneira

controlada, sendo avaliada sob diferentes condições operacionais e considerando as características específicas da rede (Stefanizzi et al., 2019).

O comportamento operacional das BFTs também é um aspecto crítico. Isso envolve a avaliação de como essas bombas adaptadas respondem às variações de pressão e vazão em diferentes pontos da rede (e Souza et al., 2023). A análise de como as BFTs se comportam em situações variadas da rede contribui para um entendimento profundo de sua aplicabilidade. Os custos de aquisição e instalação das BFTs e VRPs envolvem diversos itens, como o preço das tecnologias, custos relacionados à engenharia e adaptação das instalações existentes, além de despesas com logística e transporte. Uma análise detalhada desses custos iniciais é vital para entender o valor do investimento no início do projeto (Carravetta et al., 2018).

Os custos operacionais e de manutenção ao longo do tempo incluem aspectos como o monitoramento e manutenção das BFTs, a reposição de peças, eventuais reparos e os custos energéticos necessários para a operação dos dispositivos. A identificação e quantificação desses itens são fundamentais para uma projeção precisa dos custos durante o ciclo de vida do projeto (Dai, 2021).

As tarifas de energia elétrica também desempenham um papel crucial na análise econômica, pois impactam diretamente os custos operacionais. A variação das tarifas ao longo do tempo e possíveis políticas governamentais ou incentivos devem ser considerados, pois podem influenciar os custos energéticos de forma significativa (Oikonomou e Parvania, 2018). As receitas geradas pela produção de energia com as BFTs constituem um aspecto positivo na análise econômica. Essas receitas dependem da eficiência das BFTs, bem como da quantidade de energia gerada e vendida à rede elétrica. Uma avaliação detalhada dessas receitas é fundamental para uma análise financeira mais consistente do projeto (Stefanizzi et al., 2019).

O ROI (Retorno sobre Investimento) é um indicador essencial para avaliar a rentabilidade do investimento, expresso em termos percentuais. Ele é calculado pela divisão do lucro líquido pelo investimento inicial, multiplicado por 100, fornecendo uma medida clara da eficiência do investimento ao longo do tempo (Gupta et al., 2020). O Payback, por sua vez, determina o período necessário para recuperar o investimento inicial, sendo calculado ao dividir o investimento inicial pelo fluxo de caixa anual gerado. Um payback mais curto é frequentemente considerado um indicador de menor risco financeiro (Dai, 2021).

O VPL (Valor Presente Líquido) reflete o valor atual de todos os fluxos de caixa futuros, descontados a uma taxa específica, considerando o valor do dinheiro ao longo do tempo. Um VPL positivo indica que o projeto é financeiramente atrativo, uma vez que o valor presente dos fluxos de caixa futuros supera o investimento inicial (Cao et al., 2019). A TIR (Taxa Interna de Retorno) representa a taxa de retorno esperada do investimento, utilizada para compará-la com a taxa mínima de atratividade. Se a TIR for superior à taxa mínima, o projeto é considerado financeiramente viável (Dogani et al., 2020).

No contexto brasileiro, como observado por Reis et al. (2023), as companhias de água operam sob regimes de concessão com contratos de longo prazo, geralmente de 20 anos. Esse fator deve ser cuidadosamente considerado na análise econômica de projetos que envolvem tecnologias como BFTs e VRPs em RDAs, pois a duração desses contratos impacta diretamente a dinâmica financeira do projeto, influenciando custos, receitas e a viabilidade econômica ao longo do tempo. Isso é crucial para uma avaliação realista da viabilidade econômica, uma vez que os retornos financeiros e os custos operacionais estão intimamente ligados à duração do contrato.

4.5 Método Multicritério (TOPSIS)

A tomada de decisão multicritério é uma abordagem essencial para avaliar alternativas em problemas complexos, envolvendo múltiplos cenários (Beleski e Junior, 2023). Dentre os métodos mais aplicados, destaca-se a Técnica para Ordenação por Preferência à Solução Ideal (TOPSIS), amplamente utilizada em diversos contextos devido à sua capacidade de classificar alternativas com base na proximidade relativa à solução ideal (Domínguez, Pérez e Castro, 2021; Netto et al., 2021; Madanchian e Taherdoost, 2023).

O TOPSIS baseia-se na ideia de que a melhor alternativa deve estar mais próxima da solução ideal positiva e mais distante da solução ideal negativa. O método começa com a construção de uma matriz de decisão, onde as alternativas são avaliadas em relação aos critérios. A partir disso, são criadas as matrizes normalizadas e ponderadas. A solução ideal positiva (mais alta pontuação em todos os critérios) e a solução ideal negativa (mais baixa pontuação em todos os critérios) são determinadas (Vásquez, De La Rosa e Medina, 2021). Para cada alternativa,

calcula-se a distância euclidiana em relação às soluções ideais e negativas, e a proporção da proximidade é obtida. As alternativas são então classificadas com base nessas proporções, destacando aquelas mais próximas do ideal e mais distantes do não ideal.

Esse método tem sido aplicado em diversas áreas, incluindo avaliação da sustentabilidade empresarial, logística, gestão industrial e análise econômica (Marchetti e Wanke, 2020; Oliveira et al., 2022). Netto et al. (2021) destacam a aplicação do TOPSIS para a avaliação de programas de sustentabilidade na indústria têxtil, comparando-o com o Analytic Hierarchy Process (AHP). Os resultados demonstraram que ambos os métodos geraram rankings similares, mas o TOPSIS proporcionou índices mais dispersos, indicando maior sensibilidade às diferenças entre alternativas.

Outro estudo relevante é o de Marchetti e Wanke (2020), que propuseram um modelo híbrido combinando TOPSIS e algoritmos genéticos para avaliar o desempenho extremo do sistema ferroviário brasileiro. Os autores identificaram que fatores como centralização do controle operacional e diversificação de serviços são determinantes para melhorar a performance do setor. Na indústria metalúrgica, Oliveira et al. (2022) utilizaram o TOPSIS em conjunto com o AHP para analisar a maturidade de práticas lean-green em Pequenas e Médias Empresas (PMEs) do Brasil e Japão. O estudo revelou que as empresas japonesas apresentaram maior grau de maturidade nessas práticas, com as práticas lean-green mais desenvolvidas que as sustentáveis.

A versatilidade do TOPSIS também foi demonstrada por Martino Netto et al. (2022), que compararam quatro métodos MADM (AHP, MAUT, MAVT e TOPSIS) para avaliar estratégias de relocação industrial. Os autores concluíram que os resultados obtidos com os diferentes métodos foram consistentes, corroborando a eficiência do TOPSIS na tomada de decisão. No contexto da economia compartilhada, Labbate et al. (2020) aplicaram o TOPSIS para classificar barreiras à operacionalização de Modelos de Negócio Produto-Serviço (PSS) no Brasil. O estudo apontou a resistência à mudança e a falta de habilidades específicas como os principais desafios.

No contexto de redução de CO₂, Julio et al. (2023) utilizaram o TOPSIS para classificar parâmetros críticos em sistemas de captura pós-combustão, otimizando custos e eficiência energética. Os resultados indicaram uma economia operacional de

US\$ 20/tCO₂ e melhorias térmicas de 52%. Por fim, Fares et al. (2022) integraram o TOPSIS com outras abordagens fuzzy para priorizar facilitadores da resiliência no gerenciamento da demanda do setor de fast fashion após a pandemia da COVID-19, destacando a manutenção da fidelidade do cliente como o fator mais crítico.

Dessa forma, o TOPSIS tem demonstrado aplicabilidade e confiabilidade em diversas áreas, sendo uma ferramenta consistente para análise de decisão multicritério, permitindo uma avaliação abrangente de alternativas e facilitando a tomada de decisões estratégicas.

5 ARTIGO 1

Protótipo para análise técnica e econômica de bombas que funcionam como turbinas em redes de distribuição de água

Ingrid Luna Baia Viana^{1,2}, Davi Edson Sales e Souza^{1,2} e Júnior Hiroyuk Ishihara^{1,2,3}

¹Universidade Federal do Pará, Brasil

²Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Brasil

³Núcleo de Desenvolvimento Amazônia em Engenharia, Brasil

Autor correspondente: Ingrid Luna Baia Viana (e-mail: ingridluna.eng@gmail.com).

Este projeto contou com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

RESUMO O protótipo denominado FliessEnergy foi desenvolvido para integrar metodologias consolidadas (TOPSIS), com tecnologias modernas, como TypeScript e Angular, visando a análise técnico-econômica em redes de distribuição de água. A plataforma permite calcular rankings baseados em critérios múltiplos, auxiliando gestores na tomada de decisão ao avaliar a similaridade das alternativas com as melhores e piores condições. O sistema foi implementado em Python, garantindo precisão nos cálculos e oferecendo uma interface gráfica intuitiva. Hospedado na Vercel, o FliessEnergy apresenta um layout responsivo e escalável, proporcionando uma experiência otimizada ao usuário. A aplicação prática demonstrou sua eficácia, identificando o Cenário 1 como a melhor alternativa para implementação de BFTs, enquanto o Cenário 5 foi considerado o menos favorável. Além da análise técnica, o software incorpora o cálculo do Payback energético, permitindo avaliar a viabilidade econômica das BFTs. Considerando uma vazão de 0,020 m³/s e um investimento inicial de R\$100.000, o tempo de retorno foi estimado em aproximadamente 5 anos, reforçando a atratividade financeira da solução. Para garantir a confiabilidade dos resultados, utilizou-se o PyTOPS, permitindo 500 simulações com variações nos pesos dos critérios. A baixa variabilidade entre os cenários confirmou a consistência do modelo. Com aprimoramentos futuros e integração de bases de dados, espera-se que esta ferramenta contribua significativamente para decisões estratégicas no setor de saneamento, promovendo a adoção de BFTs em redes de distribuição de água.

Palavras-Chave TOPSIS; Python; Angular; Multicritério.

INTRODUÇÃO

As redes de distribuição de água (RDAs) desempenham um papel essencial no fornecimento adequado de água, tanto em quantidade quanto em qualidade, aos consumidores. No entanto, esses sistemas geralmente enfrentam desafios relacionados ao desperdício de água e energia, muitas vezes devido à pressão excessiva na rede [1], [2]. Essa situação pode levar a vazamentos, rupturas, deterioração da qualidade da água e abastecimento instável, resultando em insatisfação entre os usuários do serviço [3], [4].

Para otimizar a eficiência da rede, minimizar o desperdício e promover a sustentabilidade ambiental [5], é crucial que as RDAs trabalhem para reduzir o excesso de

pressão. Essas condições inadequadas não só causam perdas de água, mas também intensificam o consumo de energia nas estações, aumentando os custos operacionais e contribuindo para as emissões de gases de efeito estufa (GEE) [6]. A pressão é geralmente ajustada usando válvulas redutoras de pressão (VRPs).

Esses dispositivos dissipam o excesso de energia, requerem manutenção frequente e têm baixa adaptabilidade às variações de consumo ao longo das horas de operação [7]. Como tal, as Bombas Funcionando como Turbinas (BFTs) surgiram como uma alternativa viável, utilizando bombas centrífugas ajustadas para funcionar em modo reverso, possibilitando controlar a variação de pressão ao

longo do dia e converter esse excesso de pressão em energia elétrica [8].

Na literatura, estudos recentes têm mostrado o potencial das BFTs para substituir as VRPs, principalmente por meio do controle de pressão e recuperação de energia [9], [6], com vantagens significativas em termos de redução do consumo energético, redução das emissões de GEE, baixo custo de implementação e manutenção, bem como maior flexibilidade para atender demandas variáveis na rede [3]. Além disso, a recuperação de energia é destacada como uma estratégia sustentável, alinhada com as metas globais de redução de emissões de GEE [10].

No entanto, para que as BFTs sejam empregadas com sucesso em RDAs, é fundamental realizar uma análise técnico-econômica abrangente. Essa avaliação deve considerar não apenas aspectos hidráulicos e energéticos, mas também questões financeiras e ambientais. É importante que a implementação das BFTs não só ajude a reduzir os custos operacionais, mas também aumente a eficiência das redes de distribuição de água, contribuindo para a proteção do meio ambiente. Uma análise cuidadosa de todos esses fatores é essencial para entender a viabilidade da tecnologia em diferentes cenários [11]. Dessa forma, as decisões tomadas podem ser mais sustentáveis e alinhadas às melhores práticas do setor, beneficiando tanto as empresas quanto as comunidades que dependem dessas redes.

A falta de modelos computacionais para otimizar essas análises limita a capacidade dos gestores de avaliar alternativas e tomar decisões de forma rápida e sólida. A variabilidade de pressão e demanda na rede torna essencial o uso de métodos de simulação hidráulica e energética para avaliar o desempenho das BFTs [12], [3].

Métodos multicritério, como a Técnica de Ordem de Preferência de Similaridade à Solução Ideal (TOPSIS), destacam-se na avaliação de vulnerabilidades e alternativas em RDAs [13], [14], [29]. Portanto, este estudo desenvolve um programa computacional para apoio à decisão utilizando o TOPSIS implementado em Python, visando uma análise eficiente e precisa, integrando critérios técnicos, econômicos e ambientais recomendados na literatura.

Esta pesquisa contribui para a agenda global de sustentabilidade e energia renovável ao propor uma solução viável para a geração de energia em RDAs, uma vez que viabiliza a redução dos custos operacionais, a redução das perdas de água e energia, a mitigação das emissões de GEE e a melhoria da qualidade do serviço para os consumidores.

METODOLOGIA

O objetivo deste estudo é estabelecer um modelo simples, consistente e imparcial de apoio à tomada de decisão para avaliar a viabilidade técnica e econômica de BFTs em RDAs, usando técnicas multicritério (TOPSIS) e linguagem de programação para desenvolver um protótipo que interprete

dados de entrada sem um banco de dados inicialmente. Posteriormente, foi desenvolvida uma interface gráfica para facilitar a interação do usuário com o modelo.

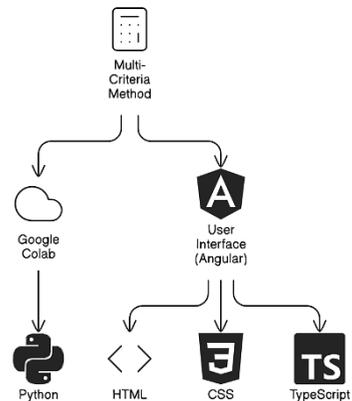


Figura 1. Diagrama do projeto.

A. MÉTODO MULTICRITÉRIO: TOPSIS

A Técnica de Ordenação de Preferência por Similaridade à Solução Ideal (TOPSIS) é amplamente utilizada, sendo um método multicritério focado na ordenação de alternativas, avaliadas com base em vários critérios, identificando sua proximidade relativa com estados ideais e não ideais [15], [16] oferecendo uma abordagem estruturada e quantitativa que facilita a priorização dessas alternativas em diferentes contextos [17]. Essa flexibilidade do TOPSIS é um de seus maiores pontos fortes [18], com interação consistente com várias linguagens de programação.

O método inicia-se com a construção de uma matriz de decisão, onde as alternativas são avaliadas de acordo com os critérios, após, matrizes normalizadas e ponderadas são criadas. A solução ideal positiva (pontuação mais alta em todos os critérios) e a solução ideal negativa (pontuação mais baixa em todos os critérios) são determinadas [19].

Para cada alternativa, calcula-se a distância euclidiana entre as soluções ideal e negativa e obtém-se a razão de proximidade. As alternativas são então classificadas com base nessas proporções, destacando aquelas mais próximas do ideal e mais distantes do não ideal. As etapas, conforme [16], são exemplificadas na Tabela 1.

TABELA 1: MÉTODO TOPSIS

Nº	TOPSIS	Objetivo	Como?
1	Normalização	Transformar as diferentes escalas dos critérios em uma escala	Dividir cada valor pelo comprimento da coluna
2	Matriz ponderada	Aplicar pesos aos critérios normalizados para refletir sua importância relativa	Multiplicar cada valor normalizado pelo peso correspondente ao critério
3	Soluções ideais	Identificar as melhores (ideais)	Selecionar os valores máximos e

		positivos) e as piores (ideais negativos) alternativas para cada critério	mínimos da matriz ponderada, dependendo se o critério é benéfico ou não
4	Distâncias para soluções ideais	Medir a distância de cada alternativa das soluções positivas e negativas	Calcular a raiz quadrada da soma dos quadrados das diferenças entre os valores ponderados e as soluções ideais
5	Índice de similaridade	Determinar o quão perto cada alternativa está da solução ideal positiva em relação à solução ideal negativa	Calcular a raiz quadrada da soma dos quadrados das diferenças entre os valores ponderados e as soluções ideais
6	Classificação das alternativas	Classificar as alternativas com base no índice de similaridade	Ordenadas com base nos valores de C_i , de forma que a alternativa com maior C_i é considerada a melhor

A atribuição de pesos aos critérios é uma parte crucial do processo, pois eles refletem a importância relativa de cada critério [18] onde o usuário é livre para fazer essa atribuição. Foram analisados métodos de obtenção automática dos pesos, como o método da Entropia [20] por ser objetivo, baseado nos dados da matriz de avaliação, e não depender exclusivamente da subjetividade dos tomadores de decisão.

Todavia, para o propósito deste projeto, os códigos acabaram não conseguindo ser imparciais, sendo necessário um limiar ou banco de dados complexo. Dessa forma, por conta da limitação na literatura [3] quanto às inúmeras variáveis pertinentes às BFTs em RDAs reais, optou-se por tratar cada critério com pesos iguais (mesmo nível de importância).

Os cálculos para cada etapa são mostrados na Figura 1, que descreve o procedimento metodológico combinado com Python, linguagem essa, que possui código aberto amplamente utilizada em desenvolvimento web [21].

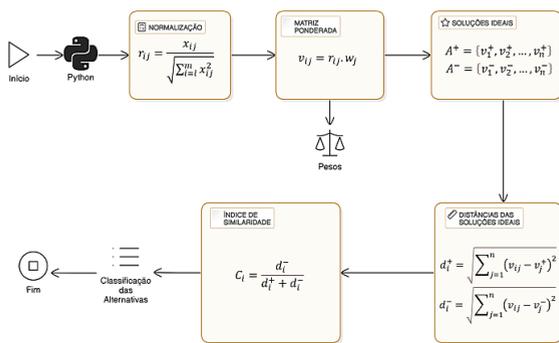


Figura 2. Procedimento metodológico para aplicação do TOPSIS.

Onde:

r_{ij} é o elemento normalizado da matriz de decisão; x_{ij} representa o valor original da matriz de decisão na linha i e na coluna j , cada elemento x_{ij} corresponde ao valor do critério j para a alternativa i ;

$\sum_{i=1}^m x_{ij}^2$ trata-se da soma dos quadrados dos elementos da coluna j da matriz de decisão. Aqui, m é o número de alternativas.

A soma dos quadrados é usada para calcular a norma euclidiana (ou comprimento) do vetor coluna j ; $\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}$ o operador de raiz quadrada é aplicado à soma dos quadrados dos elementos da coluna j , resultando na norma euclidiana.

w_j representa o peso do critério j ; v_{ij} valor ponderado e normalizado do critério j para a alternativa i .

v_j^+ representa o melhor valor de v_{ij} para o critério j (máximo se o critério for benéfico, e mínimo se o critério for custo); v_j^- O pior valor de v_{ij} para o critério j (mínimo se o critério for benéfico, e máximo se o critério for custo).

d_i^+ é a distância da alternativa i para a solução ideal positiva; d_i^- é a distância da alternativa i para a solução ideal negativa; n número de critérios.

C_i representa o coeficiente de similaridade i Quanto mais próximo de 1, melhor a alternativa: $0 \leq C_i \leq 1$. A alternativa com maior C_i é considerada a melhor.

Esse procedimento garante que a técnica TOPSIS possa identificar a alternativa que tem a menor distância em relação à solução ideal positiva e a maior distância em relação à solução ideal negativa, facilitando a tomada de decisão.

A. APLICAÇÃO DO MODELO EM PYTHON

Uma vez definidas as equações TOPSIS, a implementação é realizada utilizando a linguagem de programação Python, com uso extensivo da biblioteca NumPy para manipulação de matrizes e realização de cálculos numéricos, conforme procedimento metodológico da Figura 2, o que garante a precisão e eficiência dos resultados. O Google Colab (Google Colaboratory) foi usado para executar os códigos. Se trata de uma plataforma de acesso aberto que possibilita a execução de códigos em Python diretamente no navegador, dispensando qualquer instalação ou configuração, oferecendo um ambiente interativo ideal para o desenvolvimento, testes e a execução de scripts, sendo bastante utilizado em áreas como ciência de dados, aprendizado de máquina e computação científica [28].

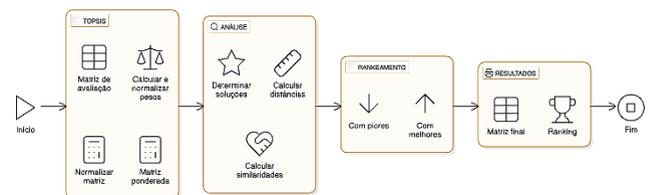


Figura 3. Procedimento para aplicação em Python.

A classe Topsis é então inicializada com a matriz de avaliação das alternativas e dos critérios, conforme apresentado na Tabela 2. A matriz de avaliação é convertida

em uma matriz NumPy para facilitar as operações matemáticas. A estrutura de classe também define variáveis para armazenar resultados intermediários e finais.

TABELA 2: CLASSE *Topsis* INICIALIZADA.

1	<code>import numpy as np</code>
2	<code>classe Topsis:</code>
3	<code>def __init__(self, matriz_avaliacao, criterios):</code>
4	<code>self.matriz_avaliacao = np.array(matriz_avaliacao,</code>
5	<code>dtype="float")</code>
6	<code>self.criterios = np.array(criterios, dtype="float")</code>
7	<code>self.num_linhas, self.num_colunas =</code>
8	<code>self.matriz_avaliacao.shape</code>
9	<code>self.matriz_pesos = Nenhum</code>
10	<code>self.matriz_normalizada = Nenhum</code>
11	<code>self.matriz_normalizada_ponderada = Nenhum</code>
12	<code>self.piores_alternativas = Nenhum</code>
13	<code>self.melhores_alternativas = Nenhum</code>
14	<code>self.distancia_piores = Nenhum</code>
15	<code>self.distancia_melhores = Nenhum</code>
16	<code>self.similaridade_piores = Nenhum</code>
17	<code>self.similaridade_melhores = Nenhum</code>

Realizado esse procedimento, todas as etapas descritas na Figura 1 são executadas em sequência para gerar a classificação das alternativas, após, o que a matriz de avaliação deve ser preenchida pelo usuário de acordo com os critérios estabelecidos na Tabela 3.

Os dados de entrada, que refletirão a análise técnica e econômica do sistema para resultar no melhor cenário a ser escolhido, devem ser atribuídos de acordo com a necessidade e interesse do usuário, portanto, o programa deve ser capaz de trabalhar com diversas variáveis. Para esta análise, a matriz de avaliação representará os principais critérios comuns, juntamente com os valores manipulados de acordo com a análise de RDAs reais estudadas em [3] e [4], que trabalharam em redes com variabilidade de vazão e pressão, um requisito essencial, uma vez que as BFTs são mais eficazes em locais onde há flutuações significativas sob condições operacionais variáveis.

Os critérios testados no programa serão: custo médio de aquisição de uma BFT(R\$), que representa o valor médio necessário para comprar uma BFT; recuperação de energia pela BFT (Kwh/ano), sendo a quantidade de energia gerada anualmente; impacto ambiental em termos de redução de CO_2 por tonelada por ano devido ao uso da BFT na RDA; e o retorno sobre o investimento (Payback) expressando o tempo médio em anos, que reflete o tempo necessário para recuperar o investimento inicial com a economia gerada.

TABELA 3: DADOS DE ENTRADA

Cenários	Custo (R\$)	Critérios		
		Recuperação de energia (kWh/ano)	Redução de CO_2 /t. ano	Retorno (anos)
1	10.164,00	11.463,00	41,71	3,5
2	7.552,10	4.532,25	35,00	6
3	11.822,00	14.906,38	45,71	2
4	8.730,55	6.500,25	20,00	5,5
5	9.671,70	10.020,44	29,00	3

O cenário 1 será avaliado em relação aos respectivos critérios, e essa mesma avaliação é aplicada aos cenários seguintes. Esta estrutura é típica da análise multicritério, onde vários cenários ou alternativas são avaliados com base em diferentes critérios, onde cada um representará medidas específicas de custo, recuperação de energia, redução de CO_2 e payback.

Uma vez definidos e implementados os métodos, o modelo é executado com a matriz e os critérios de avaliação definidos. O método calcular é chamado para realizar todos os cálculos e gerar a classificação das alternativas. Além disso, a matriz de avaliação pode ser impressa para verificação. A Tabela 4 apresenta um resumo sequencial dos códigos.

TABELA 4: RESUMO SEQUENCIAL DOS CÓDIGOS UTILIZADOS.

1	<code>[...]</code>
2	<code>def calcular_similaridade(self):</code>
3	<code>self.similaridade_piores = self.distancia_piores /</code>
4	<code>(self.distancia_piores + self.distancia_melhores)</code>
5	<code>self.similaridade_melhores = self.distancia_melhores /</code>
6	<code>(self.distancia_piores + self.distancia_melhores)</code>
7	<code>[...]</code>
8	<code>def ranquear_para_similaridade_melhores(auto):</code>
9	<code>return self.ranquear(self.similaridade_melhores)</code>
10	<code>[...]</code>
11	<code>def imprimir_matriz_avaliacao(self):</code>
12	<code>print("Matriz de Avaliação por Linhas:")</code>
13	<code>for i in range(self.matriz_avaliacao.shape[0]):</code>
14	<code>linha_formatada = [int(x) se x.is_integer() else x para x em</code>
15	<code>self.matriz_avaliacao[i, :]]</code>
16	<code>print(f"Cenário {i + 1}: {linha_formatada}")</code>

Esse detalhamento de aspectos metodológicos garante que cada etapa do modelo TOPSIS seja compreensível e replicável, permitindo uma avaliação técnica e econômica das BFTs na RDA desejada.

A consistência dos dados foi avaliada usando a metodologia de [26]. Os autores desenvolveram um sistema de código aberto chamado PyTOPS, e tem sido utilizada em projetos atuais [30] e [31]. O programa permite ao usuário fazer múltiplas simulações em que os pesos são ajustados aleatoriamente dentro de um intervalo especificado, ajudando a gerar diferentes cenários e observar como as classificações

das alternativas mudam em resposta a essas variações, permitindo verificar a estabilidade do modelo de decisão, ajudando a entender se as alternativas mudam com o mínimo de perturbações nos pesos, o que é crucial para a confiabilidade do modelo de decisão.

B. INTERFACE DO PROGRAMA

Para desenvolver uma aplicação híbrida que funcione tanto em dispositivos móveis como na web [22], foi utilizado o framework Angular, que se trata de uma estrutura de design de aplicativos e plataforma de desenvolvimento para criar aplicativos de páginas únicas eficientes e sofisticados [23]. Envolve o uso de um sistema de componentes, que são unidades modulares compostas por arquivos HTML, TypeScript e seletores CSS, com propósito de simplificar o desenvolvimento de aplicativos web, oferecendo uma estrutura de model-view-controller (MVC) que torna mais simples o desenvolvimento, a manutenção e os testes dos aplicativos [24]. Sendo por fim, hospedado no em serviço de acesso aberto, Vercel.

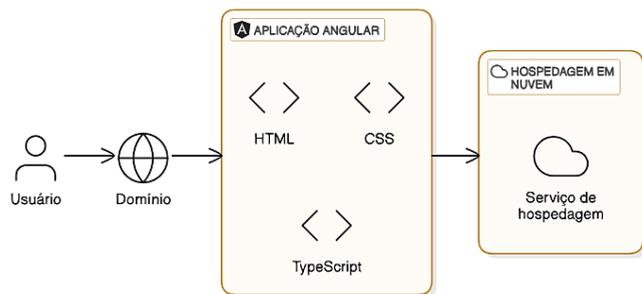


Figura 4. Arquitetura da interface de usuário.

C. ANGULAR: O MOTOR POR TRÁS DO FLIESSENERGY

Para este projeto, a interface do modelo será chamada de "FliessEnergy" (referência á energia de fluxo), que usará o Angular para criar um sistema escalável, responsivo e de alto desempenho. As principais características do Angular neste programa estão descritas na Figura 2. Possui sincronização automática de dados entre a interface do usuário e o modelo de dados (TOPSIS), o que simplifica as informações dinâmicas.

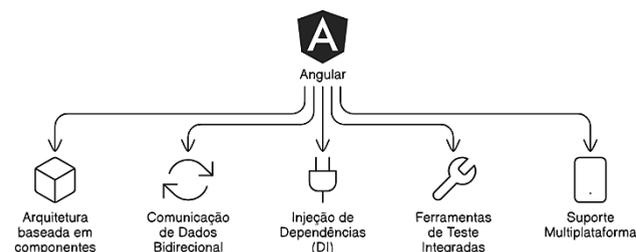


Figura 5. Principais recursos do Angular

O Angular gerencia as dependências do projeto de forma eficiente, promovendo um código mais limpo e modular, com suporte nativo para testes unitários e de integração, garantindo que as aplicações sejam estáveis e confiáveis. Além de aplicações web, o Angular pode ser usado para desenvolver aplicativos móveis por meio de integrações como o Ionic, porém, para o presente projeto, será utilizado apenas via web. A sua organização em componentes e a capacidade de lidar com grandes volumes de dados energéticos em tempo real, fazem deste framework uma boa escolha. A Tabela 4 exemplifica os códigos utilizados nesta etapa.

TABELA 5. EXEMPLIFICAÇÃO DOS CÓDIGOS ANGULAR.

```
{
  "$schema":
    "./node_modules/@angular/cli/lib/config/schema.json",
  "versão": 1,
  "newProjectRoot": "projetos",
  "projetos": {
    "FliessEnergy ": {
      "projectType": "aplicativo",
      "esquemas": {
        "@schematics/angular:componente": {
          "estilo": "scss"
        }
      },
      "raiz": "",
      "raiz_fonte": "src",
      "prefixo": "aplicativo",
      "arquiteto": {
        "construir": {
          "builder": "@angular-devkit/build-angular:application",
          "opções": {
            "outputPath": "dist/ FliessEnergy ",
            "indice": "src/index.html",
            "browser": "src/main.ts",
            "polyfills": [
              "zone.js"
            ]
          }
        }
      }
    }
  }
}
```

Os códigos refletem a estrutura dos elementos do projeto, abrangendo ajustes para variados ambientes (produção e desenvolvimento); definem estilos, scripts e recursos; testes unitários; além de configurações do servidor de desenvolvimento.

Para a estrutura visual, foi utilizado HTML (HyperText Markup Language), que é a base de qualquer projeto web. No FliessEnergy, ele desempenha um papel essencial na organização e funcionalidade da interface. As páginas e os componentes foram estruturados para garantir que as informações sejam apresentadas de forma clara e acessível. Graças às diretivas do Angular, o HTML se torna mais

dinâmico e poderoso, permitindo a integração direta com a lógica do sistema.

O design e identidade visual são feitos com CSS (Cascading Style Sheets). Combinando design moderno e responsivo para garantir uma experiência consistente em dispositivos de diferentes tamanhos, com técnicas modernas, como grid layout e media queries, para garantir que a interface se ajuste automaticamente a diferentes tamanhos de tela, desde desktops até dispositivos móveis.

Para a lógica e inteligência do sistema, é utilizado TypeScript por ser a linguagem principal do Angular. Ele combina o melhor do JavaScript com tipagem estática, permitindo que os desenvolvedores escrevam códigos mais organizados, seguros e fáceis de manter. Também facilita a integração com Interface de Programação de Aplicações (APIs) externas para coleta de dados energéticos em tempo real, garantindo que o FliessEnergy possa oferecer informações precisas e atualizadas aos usuários.

Resultados e Discussão

Inicialmente, utilizando o Colab, com o objetivo de ajustar os códigos em Python, foram testados valores fictícios na matriz de entrada do TOPSIS. Posteriormente, foi preenchida a matriz de avaliação no programa para gerar o ranking de similaridade com as melhores e piores condições utilizando os valores da Tabela 3 descritos na metodologia, retornando os valores descritos na Tabela 6.

TABELA 6. RANKING PARA SIMILARIDADE MELHORES E PIORES CONDIÇÕES.

Classificação por semelhança com as piores condições: [5, 1, 4, 3, 2]
Classificação por semelhança com as melhores condições: [2, 3, 4, 1, 5]
Matriz de Avaliação por Linhas:
Cenário 1: [10164, 11463, 41, 3.5]
Cenário 2: [7552, 2500, 900, 1.5]
Cenário 3: [11822, 14906, 45.71, 2]
Cenário 4: [8730, 6500, 20, 5.5]
Cenário 5: [9671, 10020, 29, 3]

A classificação final do resultado fornecido indica a ordem de preferência das alternativas com base em suas semelhanças em relação às piores e melhores condições avaliadas pelo método TOPSIS. O cenário 2 é o mais semelhante às melhores condições, nesta perspectiva, seria a alternativa ideal, pois apresenta o maior índice de similaridade C_i , seguido pelos valores progressivamente menos semelhantes. O cenário 3 apresentou um desempenho ligeiramente inferior, porém, ainda dentro de uma faixa aceitável, os cenários 4 e 1 se distanciam das condições ótimas, e finalmente o Cenário 5 foi considerado o mais distante das melhores condições, ou seja, menor valor de C_i , portanto, a alternativa menos favorável se considerar os demais cenários. Esse comportamento da classificação ajuda o usuário a visualizar de forma clara qual

alternativa oferece o melhor equilíbrio entre as condições ideais e as condições mais desfavoráveis.

Foram realizadas cerca de 500 simulações, parte resultando na respectiva sequência de [2, 3, 4, 1, 5] para os melhores cenários, sendo possível extrair as médias de proximidade relativa e desvio padrão da similaridade entre os resultados deste projeto e os obtidos pelo PyTOPS, conforme mostra a Figura 3.

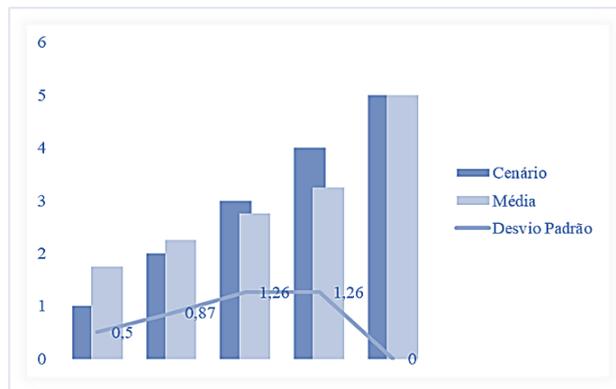


Figura 6. Médias de proximidade relativa e desvio padrão da similaridade TOPSIS e PyTOPS.

A média de similaridade mostra a tendência central das classificações dos cenários ao longo de todas as iterações realizadas. Observa-se que o Cenário 5 apresenta a maior média, indicando que é consistentemente classificado como menos desejável nas simulações. Enquanto os Cenários 2 e 3 apresentam médias intermediárias, o que está alinhado com a classificação das melhores condições. A variabilidade das classificações é medida pelo desvio padrão, mostrando pouca variação entre os cenários, o que indica consistência entre os resultados deste projeto e o PyTOPS, diante da subjetividade da metodologia empregada.

D. FLIESSENERGY

Com a metodologia definida e organizada, foi utilizada a plataforma gratuita de hospedagem de aplicações web, Vercel, para hospedar o FliessEnergy, resultando no layout da Figura 4, onde o usuário tem a opção de entrar sem a necessidade de fazer login inicialmente, afim de facilitar o acesso imediato ao sistema, permitindo que os usuários possam começar a inserir dados e realizar os cálculos de forma acessível, promovendo um uso intuitivo desde o início.



Figura 7. Layout final do FliessEnergy.

A interface do FliessEnergy, conforme ilustrado na Figura 5, permite que o usuário personalize a análise de acordo com a quantidade de critérios e cenários a serem considerados, o que confere flexibilidade ao sistema. A possibilidade de adicionar cenários e selecionar o método de atribuição de pesos, proporciona um controle detalhado sobre os parâmetros de avaliação. Esse nível de personalização permite que diferentes configurações de sistema sejam simuladas de forma rápida e eficaz, ajudando na comparação entre as alternativas com base nos critérios de desempenho selecionados.

Para este protótipo, foi selecionada a opção de "pesos iguais", juntamente com os dados de entrada descritos na Tabela 3 da metodologia, para atestar a funcionalidade do programa.

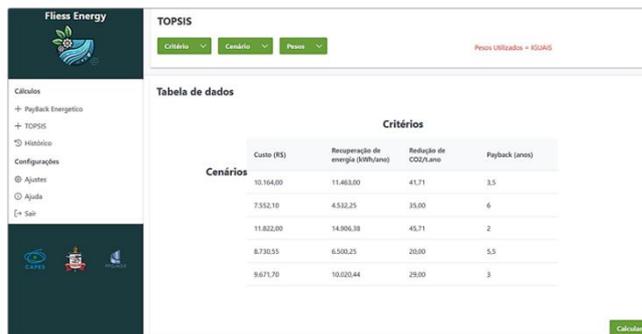


Figura 8. Dados de entrada na interface do FliessEnergy.

Com os dados devidamente preenchidos, o modelo imediatamente iniciou a análise direcionada para o ecrã de resultados, retornando o ranking com as opções ideais e um gráfico exemplificativo, como mostra a Figura 6.



Figura 9. Resultado na interface.

A classificação final indica a ordem de preferência para o usuário, onde o Cenário 1 se mostrou a configuração ideal para a escolha, quando se considera a proximidade com as melhores condições. Por outro lado, o Cenário 5 ficou mais próximo das piores condições, indicando que é a alternativa menos favorável. Esse resultado permite que o tomador de decisão escolha a melhor alternativa com base na perspectiva que considera mais relevante. Caso o foco seja aproximar-se das melhores condições, o Cenário 1 deve ser priorizado. Se a preocupação for evitar as piores condições, a classificação também auxilia, sugerindo quais cenários devem ser evitados. A possibilidade de o usuário tomar decisões com base em suas prioridades (se focar nas melhores condições ou evitar as piores) é um ponto forte do programa, pois permite uma abordagem decisória personalizada.

Além disso, foi adicionado o cálculo do Payback, de acordo com os códigos da Tabela 7, que se baseia na recuperação de energia do sistema, seguindo os cálculos metodológicos de [9], para que o usuário decida primeiramente se as características de sua RDA possui um retorno viável, e uma vez que seja, prosseguir aos cálculos do TOPSIS para análise técnica e econômica da BFT na RDA desejada. Os dados de entrada são comuns entre os gerentes de sistemas de abastecimento de água. A Figura 7 mostra os resultados na interface.

TABELA 7: PAYBACK ENERGÉTICO: TEMPO DE RETORNO PARA A ENERGIA DE RECUPERAÇÃO DO SISTEMA.

1	def calcular_energia_potencial(rho, g, Q, H, eficiencia):
2	potencia_watts = rho * g * Q * H * eficiencia
3	return potencia_watts / 1000
4	def calcular_producao_diaria(potencia_kw, horas_operacao):
5	return potencia_kw * horas_operacao
6	def calcular_beneficio_anual(energia_diaria_kWh, dias_ano, tarifa_energia):
7	return energia_diaria_kWh * dias_ano * tarifa_energia
8	def calcular_payback(investimento_inicial, beneficio_anual):
9	return investimento_inicial / beneficio_anual



Figura 10. Retorno de energia.

O resultado mostra que uma rede com BFT instalada, com vazão de $0.020 \text{ m}^3/\text{s}$ e investimento inicial de R\$ 100.000, poderá produzir diariamente 115,37kW/h, tendo um benefício anual de R\$ 21.054,22, com tempo de retorno (Payback) de aproximadamente 5 anos. Dessa forma, fica claro para o tomador de decisão os benefícios iniciais esperados com o uso de BFTs na RDA informada agilmente pelo programa.

Assim sendo, o FliessEnergy destaca-se por sua modularidade, o que significa que ele pode ser facilmente adaptado e expandido conforme as necessidades futuras. A possibilidade de adicionar novos recursos, como bancos de dados, aprendizado de máquina e interação com inteligência artificial, torna o sistema escalável e flexível. Isso é crucial, pois permite que o programa evolua conforme as demandas dos sistemas de abastecimento de água, que garante uma navegação intuitiva, facilitando a interação com o sistema, mesmo para usuários com pouca experiência técnica. O design simples e eficiente contribui para uma aprendizagem rápida e uso contínuo, aumentando a adesão ao sistema por diferentes perfis de usuário.

Outro ponto forte, é sua manutenção simplificada devido ao código bem estruturado e documentado, o que facilita futuras atualizações e garante a longevidade do programa, permitindo que ele se mantenha relevante à medida que novas tecnologias e necessidades surgem no campo do abastecimento de água.

Por fim, a segurança é garantida usando as práticas recomendadas do TypeScript e do Angular, que ajudam a criar aplicativos mais seguros, consistentes, proteger dados e a confiabilidade do sistema.

CONCLUSÕES

O desenvolvimento do FliessEnergy é um avanço significativo no auxílio à decisão técnica e econômica em RDAs para o uso de BFTs. A fusão do método TOPSIS com tecnologias modernas como TypeScript e Angular permitiu o desenvolvimento de uma plataforma intuitiva, escalável e sólida, validada por meio de simulações no PyTOPS. A baixa variabilidade dos rankings ao longo das simulações indica que os resultados são consistentes e pouco sensíveis a pequenas mudanças nos pesos dos critérios, reforçando a confiabilidade do FliessEnergy. Os resultados obtidos na classificação de cenários pelo TOPSIS mostram a eficiência do sistema em

reconhecer opções ideais, considerando diversos critérios de avaliação. Além disso, a incorporação do cálculo do Payback oferece uma avaliação de custo e benefício, permitindo que os usuários analisem a viabilidade de aplicar BFTs antes de tomar decisões mais complexas.

A consistência das simulações realizadas, corroborada pela comparação com o PyTOPS, reforça a confiabilidade do modelo de decisão. O sistema modular, associado às boas práticas de programação, garante a escalabilidade e segurança da aplicação, tornando-se uma ferramenta versátil e confiável para gestores de sistemas de abastecimento de água.

Portanto, a FliessEnergy não só simplifica o estudo técnico-econômico dos sistemas hídricos, mas também promove a implementação de tecnologias sustentáveis para produção de energia e regulação de pressão, auxiliando na inovação e sustentabilidade na gestão dos recursos hídricos.

Para trabalhos futuros, visando eliminar a necessidade de o usuário preencher valores dos critérios, recomenda-se a criação do banco de dados com pesquisa in loco detalhada específica para BFTs em RDAs, afim de cobrir lacunas existentes na literatura atual e definir limiares para os pesos requeridos na metodologia TOPSIS; também se faz necessário testes com variações nos pesos e métodos de atribuição automática dos pesos. Esses dados são fundamentais para a implementação de aprendizado de máquina, para que o programa possa fazer o processamento de dados apenas recebendo dados de entrada com as características da RDA pretendida, retornando aos usuários uma análise detalhada sobre a implementação de BFTs, em termos técnicos, econômicos e de sustentabilidade, de forma autônoma e precisa.

REFERÊNCIAS

- [1] S. SPEDALETTI, M. ROSSI, G. COMODI, D. SALVI e M. RENZI, "Recuperação de energia em tubulações de adução por gravidade de um sistema de abastecimento de água (WSS) para áreas urbanas usando bombas como turbinas (PaTs)", *Sustainable Energy Technologies And Assessments*, p. 101040, junho de 2021.
- [2] T. B. d. EGITO, J. R. G. d. AZEVEDO e S. d. T. M. BEZERRA, "Otimização da operação de sistemas de distribuição de água com ênfase na otimização conjunta de bombas e reservatórios", *Abastecimento de Água*, pp. 1094-1105, 2023.
- [3] D. E. S. e. SOUZA, A. L. A. MESQUITA e C. J. C. BLANCO, "Regulação de Pressão em uma Rede de Distribuição de Água Usando Bombas como Turbinas em Velocidade Variável para Recuperação de Energia", *Gestão de Recursos Hídricos*, pp. 1183-1206, 2023.
- [4] V. R. B. d. SILVA, J. H. ISHIHARA, I. L. B. VIANA, J. M. d. SOUSA e D. E. S. e. SOUZA, "Análise do aproveitamento energético em redes de distribuição de água com a utilização de bombas como turbina (BFT)", *Revista Dae*, 2023.
- [5] N. A. BARTON, S. H. HALLETT e S. R. JUDE, "Os desafios de prever falhas de tubulação em redes de água limpa: uma visão da prática atual", *Water Supply*, pp. 527-541, 2022.
- [6] M. STEFANIZZI, T. CAPURSO, G. BALACCO, M. BINETTI, S. M. CAMPOREALE e M. TORRESI, "Seleção, controle e viabilidade técnico-econômica de Bombas como Turbinas em Redes de Distribuição de Água", *Renewable Energy*, pp. 1292-1306, 2020.

- [7] F. PUGLIESE, F. d. PAOLA, N. FONTANA, G. MARINI e M. GIUGNI, "Seleção ideal de bombas como turbinas em redes de distribuição de água", *Proceedings*, p. 685, 2018.
- [8] A. CARRAVETTA, S. DERAKHSHAN HOUREH e H. M. RAMOS, "Bombas como turbinas: Fundamentos e Aplicações", em *Springer Tracts in Mechanical Engineering*, vol. 236, Springer, 2018.
- [9] D. E. S. e. SOUZA, A. L. A. MESQUITA e C. J. C. BLANCO, "Bomba-como-turbina para recuperação de energia em redes municipais de abastecimento de água", *Revista da Sociedade Brasileira de Ciências e Engenharia Mecânica*, p. 489, 2021.
- [10] H. E. MUTIKANGA, S. K. SHARMA e K. VAIRAVAMOORTHY, "Análise de Decisão Multicritério: uma ferramenta de planejamento estratégico para a gestão de perdas de água", *Gestão de Recursos Hídricos*, pp. 3947-3969, 2011.
- [11] O. Fecarotta e A. McNabola, "Localização ideal da bomba como turbinas (PATs) em redes de distribuição de água para recuperar energia e reduzir vazamentos", *Water Resour Manage*, p. 5043-5059, 2017.
- [12] I. N. MARCHIORI, G. M. LIMA, B. M. BRENTAN e E. LUVIZOTTO JUNIOR, "Eficácia dos métodos para selecionar bombas como turbinas para operar em redes de distribuição de água", *Water Supply*, pp. 417-423, 2019.
- [13] H. M. TORNYEVIADZI, E. OWUSU-ANSAH, H. MOHAMMED e R. SEIDU, "Uma estrutura sistemática para avaliação dinâmica de vulnerabilidade nodal de redes de distribuição de água baseadas em redes multicamadas", *Engenharia de Confiabilidade e Segurança do Sistema*, p. 108217, 2022.
- [14] J. ČERNEVIČIENĖ e A. KABALINSKAS, "Revisão de métodos de tomada de decisão multicritério em finanças usando inteligência artificial explicável", *Frontiers In Artificial Intelligence*, p. 827584, 2022.
- [15] L. A. P. DOMÍNGUEZ, E. A. PÉREZ e E. L. CASTRO, "Aplicação dos métodos AMEF-TOPSIS-AHP para determinar o RPN", *Fundación de Estudios Superiores Comfanorte*, p. 37, 2021.
- [16] V. PANDEY, KOMAL e H. DINCER, "Uma revisão sobre o método TOPSIS e suas extensões para diferentes aplicações com desenvolvimento recente", *Soft Computing*, pp. 18011-18039, 2023.
- [17] I. M. BELESKI e F. R. LIMA JUNIOR, "Um estudo comparativo entre métodos Hesitant Fuzzy TOPSIS no contexto de seleção de fornecedores", *Exacta*, pp. 1-20, 2023.
- [18] M. MADANCHIAN e H. TAHERDOOST, "Um guia abrangente para o método TOPSIS para tomada de decisão multicritério", *Desenvolvimento Social Sustentável*, pp. 1-6, 2023.
- [19] J. D. H. VÁSQUEZ, J. E. S. d. LAROSA e F. E. F. MEDINA, "MODELO MULTICRITÉRIO AHP-TOPSIS: UMA ESTRATÉGIA PARA AVALIAR ALTERNATIVAS PARA GERAR ELETRICIDADE A PARTIR DE FONTES RENOVÁVEIS", *Pesquisa e Inovação em Engenharia*, pp. 175-191, 2021.
- [20] J. YU, H. SHEN, J. GOU e X. ZHANG, "A Medição do Ambiente Verde pelo Método de Entropia: um estudo baseado na área costeira de Minnan na China", *Journal Of Coastal Research*, p. 442, 2020.
- [21] Python, "Python," 2024. [Online]. Available: <https://docs.python.org/pt-br/dev/faq/general.html>. [Acesso em 10 Junho 2024].
- [22] M. V. d. C. SOARES, L. M. BRASIL e H. G. MATOS, "JOINTCE: desenvolvimento de um aplicativo mobile para acesso útil á informações do estado," *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, pp. 1568-1577, 2023.
- [23] Angular, "Documentação 2024," [Online]. Available: <https://angular.io/guide/what-is-angular>. [Acesso em 14 Junho 2024].
- [24] A. Kumar e R. K. Singh, "ANÁLISE COMPARATIVA DE ANGULARJS", *Revista Internacional de Últimas Tendências em Engenharia e Tecnologia*, pp. 225-227, 2016.
- [25] Ionic, "Documentação geral 2023," [Online]. Available: <https://ionicframework.com/docs>. [Accessed 14 junho 2024].
- [26] V. YADAV, S. KARMAKAR, P. P. KALBAR e A. DIKSHIT, "PyTOPS: uma ferramenta baseada em python para topsis", *Softwax*, pp. 217-222, 2019.
- [27] M. STEFANIZZI, T. CAPURSO, G. BALACCO, M. BINETTI, M. TORRESI e S. M. CAMPOREALE, "Bomba como turbina para estrangulamento da recuperação de energia em redes de distribuição de água", *Aip Conference Proceedings*, p. 020142, 2019.
- [28] E. K. ELSAYED e D. R. FATHY, "Semantic Deep Learning to Translate Dynamic Sign Language," *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, vol. 14, p. 316-325, 2021.
- [29] F. L. N. B. DE MELO, M. P. DA SILVA, R. R. DA SILVA, E. R. F. DE F. AIRES, "Apoio ao processo de avaliação do serviço de abastecimento de água no Rio Grande do Norte: uma abordagem multicritério", *Eng. Sanit. Ambient.*, vol. 23, n° 4, p. 675-686, 2018.
- [30] M. ZHANG *et al.*, "Optimal machine learning methods for radiomic prediction models: Clinical application for preoperative T₂*-weighted images of cervical spondylotic myelopathy", *JOR SPINE*, vol. 4, n.º 4, novembro de 2021.
- [31] T. SHARMA, G. AMARNATH, U. AMARASINGHE E S. ABDULKARIM, "Footprints of drought risk on Africa's agricultural, water and nutritional security", *Environmental Res. Lett.*, agosto de 2024.



INGRID L. B. VIANA Possui o título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Federal do Pará (UFPA), Brasil. Atualmente, está cursando Mestrado em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético na UFPA, com foco em modelos de suporte à decisão para análise técnico-econômica de bombas funcionando como turbinas para controle de pressão e aproveitamento energético em redes de distribuição de água. É docente no Instituto Federal do Pará e possui especialização em Sistemas de Gestão Integrada de Qualidade, Segurança, Meio Ambiente e Sustentabilidade.



DAVI E. S. E SOUZA recebeu o título de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia pela Universidade Federal do Pará (UFPA), Brasil. Possui o Mestrado em Engenharia Civil com concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela UFPA, além da graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental também pela UFPA. Atua nas áreas de planejamento urbano, eficiência energética, geração de energias renováveis e tecnologias em saneamento ambiental.



JÚNIOR H. ISHIHARA Possui o título de Bacharel em Engenharia Sanitária pela Universidade Federal do Pará (2008), Brasil, e o Mestrado em Engenharia Civil com ênfase em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo PPGEC/UFPA (2010). Obteve o Doutorado em Ciências com ênfase em Desenvolvimento Socioambiental pelo NAEA/UFPA (2015). Atualmente, é Professor Adjunto da Universidade Federal do Pará no Campus de Tucuruí (vínculo estatutário), Diretor Adjunto do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia (NDAE) e docente permanente nos Programas de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético (PPGINDE) e em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental (PEBGA).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração do método TOPSIS com linguagem, utilizada para processamento e cálculos avançados, e o framework Angular, aplicado na interface gráfica, resultou em uma plataforma interativa, escalável e eficiente. Hospedado na ferramenta de acesso aberto Vercel, o sistema oferece uma experiência otimizada, garantindo acessibilidade, responsividade e segurança.

O modelo se mostrou eficaz ao classificar as melhores configurações para a adoção das BFTs, destacando o Cenário 1 como a alternativa mais viável e o Cenário 5 como a menos favorável. Além da análise técnica, a ferramenta realiza também o cálculo do Payback energético, essencial para avaliar a viabilidade econômica das BFTs. Para uma vazão de 0,020 m³/s e um investimento inicial de R\$100.000, o tempo de retorno foi estimado em cerca de 5 anos, reforçando a atratividade financeira do projeto. A confiabilidade do modelo foi confirmada por meio de 500 simulações no PyTOPS, evidenciando a baixa sensibilidade dos resultados a variações nos pesos dos critérios. A arquitetura modular do FliessEnergy, aliada às boas práticas de desenvolvimento em Python e TypeScript, assegura flexibilidade para futuras atualizações.

Para aprimoramentos futuros, sugere-se a criação de um banco de dados baseado em levantamentos reais, eliminando a necessidade de preenchimento manual dos critérios e estabelecendo padrões mais precisos para a metodologia, com dimensionamento de uma rede real para atestar a funcionalidade com o upgrade. Além disso, a implementação de aprendizado de máquina permitirá que o sistema processe os dados automaticamente, oferecendo análises personalizadas e precisas. Dessa forma, o FliessEnergy se consolida como uma ferramenta promissora para auxiliar na tomada de decisão estratégica, promovendo a eficiência energética e a sustentabilidade no setor de saneamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERIZZI, J. C. et al. Speed and pressure controls of pumps-as-turbines installed in branch of water-distribution network subjected to highly variable flow rates. **Energies**, v. 12, n. 24, p. 4738, 2019.

Amazon (2023). **Amazon Machine Learning**. Disponível em: <https://docs.aws.amazon.com/pt_br/machine-learning/latest/dg/machinelearning-dg.pdf#cross-validation>. Acesso em: 10 de agosto de 2024.

Angular. **Documentação 2024**. Disponível em: <<https://angular.io/guide/what-is-angular>>. Acesso em 14 de junho de 2024.

BUTERA, Ilaria; GÓMEZ-HERNÁNDEZ, J. Jaime; NICOTRA, Silvia. Contaminant-source detection in a water distribution system using the ensemble Kalman filter. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 147, n. 7, p. 04021029, 2021.

CAO, Hao et al. Simultaneous sensor placement and pressure reducing valve localization for pressure control of water distribution systems. **Water**, v. 11, n. 7, p. 1352, 2019.

CARRAVETTA, A.; DERAKHSHAN HOUREH, S.; RAMOS, H. M. Pumps as turbines: Fundamentals and Applications. **Springer tracts in mechanical engineering**, v. 236, 2018.

ČERNEVIČIENĖ, J.; KABAĻINSKAS, A. Review of Multi-Criteria Decision-Making Methods in Finance Using Explainable Artificial Intelligence. **Frontiers In Artificial Intelligence**, [S.L.], v. 5, p. 827584, 10 mar. 2022. Frontiers Media SA. DOI: 10.3389/frai.2022.827584.

DAI, Pham Duc. 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.

DOGANI, A. et al. A hybrid meta-heuristic for a bi-objective stochastic optimization of urban water supply system. **IEEE Access**, v. 8, p. 135829-135843, 2020.

DOMÍNGUEZ, L. A. P.; PÉREZ, E. A.; CASTRO, E. L. Aplicación de los métodos AMEF-TOPSIS-AHP para determinar el RPN. **Mundo FESC**, v. 11, n. 21, p. 37-46, 2021.

E SOUZA, D.E.S.; MESQUITA, A.L.A.; BLANCO, C.J.C. Pressure Regulation in a Water Distribution Network Using Pumps as Turbines at Variable Speed for Energy Recovery. **Water Resour Manage** 37, 1183–1206, 2023. DOI: 10.1007/s11269-022-03421-9

EGITO, T. B. do; AZEVEDO, J. R. G. de; BEZERRA, S. de T. M. Optimization of the operation of water distribution systems with emphasis on the joint optimization of pumps and reservoirs. **Water Supply**, v. 23, n. 3, p. 1094-1105, 2023. DOI: 10.2166/ws.2023.065.

FARES, N.; LLORET, J.; KUMAR, V.; FREDERICO, G. F.; KUMAR, A.; GARZA-REYES, J. A. Enablers of post-COVID-19 customer demand resilience: evidence for fast-fashion msmes. **Benchmarking: An International Journal**, [S.L.], v. 30, n. 6, p. 2012-2039, 2022. DOI: 10.1108/bij-11-2021-0693.

FONTANA, N. et al. Real-time control of a PRV in water distribution networks for pressure regulation: Theoretical framework and laboratory experiments. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 144, n. 1, p. 04017075, 2018.

GELDREICH, E. E. **Microbial quality of water supply in distribution systems**. CRC Press, 2020.

GUPTA, Aditya et al. Nodal matrix analysis for optimal pressure-reducing valve localization in a water distribution system. **Energies**, v. 13, n. 8, p. 1878, 2020.

HOWE, Charles W. et al. The Value of Water Supply Reliability in Urban Water Systems 1. In: **Economics of Water Resources**. Routledge, p. 51-62, 2018.

BELESKI, I. M.; LIMA JUNIOR, F. R. Um estudo comparativo entre métodos Hesitant Fuzzy TOPSIS no contexto de seleção de fornecedores. **Exacta**, pp. 1-20, 2023.

MARCHIORI, I. N.; LIMA, G. M.; BRENTAN, B. M.; LUVIZOTTO JUNIOR, E. Effectiveness of methods for selecting pumps as turbines to operate in water distribution networks. **Water Supply** 1 March 2019; 19 (2): 417–423. doi: DOI: 10.2166/ws.2018.086

JULIO, A. A. V.; CASTRO-AMOEDO, R.; MARÉCHAL, F.; GONZÁLEZ, A. M.; PALACIO, J. C. E. Exergy and economic analysis of the trade-off for design of post-combustion CO₂ capture plant by chemical absorption with MEA. **Energy**, [S.L.], v. 280, p. 128004, 2023. DOI: 10.1016/j.energy.2023.128004.

KANDI, A. et al. Optimization of pump selection for running as turbine and performance analysis within the regulation schemes. **Energy**, v. 217, p. 119402, 2021.

Kumar, A., e Singh, R. K. Comparative analysis of angularjs and reactjs. *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology*, 7(4), 225- 227, 2016. DOI: 10.21172/1.74.030.

LABBATE, R.; SILVA, R. F.; RAMPASSO, I. S.; ANHOLON, R.; QUELHAS, O. L. G; LEAL FILHO, W. Business models towards SDGs: the barriers for operationalizing product-service system (pss) in brazil. **International Journal Of Sustainable Development & World Ecology**, v. 28, n. 4, p. 350-359, 2020. DOI: 10.1080/13504509.2020.1823517.

LISBOA, R. S. **Guia de elaboração de Trabalhos acadêmicos**, 2. ed. Belém: UFPA, 2019. 157p.

LUNA, T. et al. Improving energy efficiency in water supply systems with pump scheduling optimization. **Journal of cleaner production**, v. 213, p. 342-356, 2019.

LYDON, T.; COUGHLAN, P.; MCNABOLA, A. Pressure management and energy recovery in water distribution networks: Development of design and selection methodologies using three pump-as-turbine case studies. *Renewable Energy*, v. 114, p. 1038–1050, 2017.

MADANCHIAN, M.; TAHERDOOST, H. A comprehensive guide to the TOPSIS method for multi-criteria decision making. **Sustainable Social Development**, v. 1, n. 1, p. 1-6, 2 ago. 2023. DOI: 10.54517/ssd.v1i1.2220.

MARCHETTI, D.; WANKE, P. Efficiency of the rail sections in Brazilian railway system, using TOPSIS and a genetic algorithm to analyse optimized scenarios. **Transportation Research Part e: Logistics and Transportation Review**, [S.L.], v. 135, p. 101858, 2020. DOI: 10.1016/j.tre.2020.101858.

MARTINO NETO, J.; SALOMON, V. A. P.; ORTIZ-BARRIOS, M. A.; PETRILLO, A. Compatibility and correlation of multi-attribute decision making: a case of industrial relocation. **Annals Of Operations Research**, v. 326, n. 2, p. 831-852, 2022. DOI: 10.1007/s10479-022-04603-9.

MORANI, M.C., A. CARRAVETTA, C. D'AMBROSIO, AND O. FECAROTTA. 2021. A New Mixed Integer Non-Linear Programming Model for Optimal PAT and PRV Location in Water Distribution Networks. **Urban Water Journal** 18 (6): 394–409. DOI: 10.1080/1573062X.2021.1893359.

MUTIKANGA, H.E.; SHARMA, S.K.; VAIRAVAMOORTHY, K. Multi-criteria Decision Analysis: A Strategic Planning Tool for Water Loss Management. **Water Resour Manage** 25, 3947–3969, 2011. DOI: 10.1007/s11269-011-9896-9.

BARTON, N. A.; HALLETT, S. H.; JUDE, S. R. The challenges of predicting pipe failures in clean water networks: a view from current practice. **Water Supply** 1 January 2022; 22 (1): 527–541. DOI: 10.2166/ws.2021.255.

NETTO, A. L.; SALOMON, V. A.P.; ORTIZ-BARRIOS, M. A.; FLOREK-PASZKOWSKA, A. K.; PETRILLO, A.; OLIVEIRA, Otavio J. de. Multiple criteria assessment of sustainability programs in the textile industry. **International Transactions In Operational Research**, [S.L.], v. 28, n. 3, p. 1550-1572, 14 set. 2021. DOI: 10.1111/itor.12871.

OIKONOMOU, K.; PARVANIA, M. Optimal coordination of water distribution energy flexibility with power systems operation. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 10, n. 1, p. 1101-1110, 2018.

OLIVEIRA, G. A. et al. Lean and Green Product Development in SMEs: a comparative study between small- and medium-sized brazilian and japanese enterprises. **Journal**

Of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity, [S.L.], v. 8, n. 3, p. 123, set. 2022. DOI: 10.3390/joitmc8030123.

FECAROTTA, O.; MCNABOLA, A. Optimal Location of Pump as Turbines (PATs) in Water Distribution Networks to Recover Energy and Reduce Leakage. **Water Resources Association**, vol. 31(15), pages 5043-5059, 2017. DOI: 10.1007/s11269-017-1795-2.

PANDEY, V., KOMAL & DINCER, H. A review on TOPSIS method and its extensions for different applications with recent development. **Soft Comput** 27, 18011–18039, 2023. DOI: 10.1007/s00500-023-09011-0.

PATELIS, M.; KANAKOUDIS, V.; GONELAS, K. Pressure Management and Energy Recovery Capabilities Using PATs. **Procedia Engineering**, v. 162, p. 503–510, 2016.

Pugliese, F. et al. Optimal Selection of Pumps As Turbines in Water Distribution Networks. **Proceedings**, 2, no. 11: 685, 2018. DOI: 10.3390/proceedings2110685.

Python (2024). **Informações gerais**. Disponível em: < <https://docs.python.org/pt-br/dev/faq/general.html>>. Acesso em: 10 de junho de 2024.

REIS, F. de C. M. et al. Social effectiveness and private sanitation concessions: the CEDAE auction in Rio de Janeiro, Brazil. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 28, p. 547-559, 2023.

RENZI, M.; NIGRO, A.; ROSSI, M. A methodology to forecast the main non-dimensional performance parameters of pumps-as-turbines (PaTs) operating at Best Efficiency Point (BEP). **Renewable Energy**, v. 160, p. 16–25, 2020.

SHARMA, Tarul; AMARNATH, Giriraj; AMARASINGHE, Upali; SEID, Abdulkarim. Footprints of drought risk on Africa's agricultural, water and nutritional security. **Environmental Research Letters**, [S.L.], v. 19, n. 10, p. 104046, 10 set. 2024. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ad7478>.

SILVA, V. R. B. da; ISHIHARA, J. H.; VIANA, I. L. B.; SOUSA, J. M. de; SOUZA, D. E. S. e. Análise do aproveitamento energético em redes de distribuição de água com a

utilização de bombas como turbina (BFT). **Revista Dae**, v. 71, n. 241, p. 65-77, 2023. Revista DAE. DOI: 10.36659/dae.2023.039.

SOARES, M. V. DA C.; BRASIL, L. M.; MATOS, H. G. Jointce: desenvolvimento de um aplicativo mobile para acesso útil á informações do estado. **Revista Ibero-Americana De Humanidades, Ciências E Educação**, 9(6), 1568–1577, 2023. DOI: 10.51891/rease.v9i6.10292.

SOUZA, D.E.S.E., MESQUITA, A.L.A.; BLANCO, C.J.C. Pump-as-turbine for energy recovery in municipal water supply networks. A review. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 43, 489, 2021. DOI: 10.1007/s40430-021-03213-z.

SPEDALETTI, S.; ROSSI, M.; COMODI, G.; SALVI, D.; RENZI, M. Energy recovery in gravity adduction pipelines of a water supply system (WSS) for urban areas using Pumps-as-Turbines (PaTs). **Sustainable Energy Technologies And Assessments**, [S.L.], v. 45, p. 101040, 2021. DOI: 10.1016/j.seta.2021.101040.

STEFANIZZI, M. et al. Selection, control and techno- economic feasibility of Pumps as Turbines in Water Distribution Networks, **Renewable Energy**, vol. 162(C), pages 1292-1306, 2020.

STEFANIZZI, M. et al. Pump as turbine for throttling energy recovery in water distribution networks. In: AIP Conference Proceedings. **AIP Publishing**, 2019. DOI: 10.1063/1.5138875

TORNYEVIADZI, H. M.; NEBA, F. A.; MOHAMMED, H.; SEIDU, R. Nodal vulnerability assessment of water distribution networks: An integrated Fuzzy AHP-TOPSIS approach, **International Journal of Critical Infrastructure Protection**, vol. 34(C), 2021.

TORNYEVIADZI, H. M.; OWUSU-ANSAH, E.; MOHAMMED, H.; SEIDU, R. A systematic framework for dynamic nodal vulnerability assessment of water distribution networks based on multilayer networks. **Reliability Engineering & System Safety**, [S.L.], v. 219, p. 108217, mar. 2022. DOI: 10.1016/j.ress.2021.108217.

VAKILIFARD, N. et al. The role of water-energy nexus in optimising water supply systems—review of techniques and approaches. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 1424-1432, 2018.

VÁSQUEZ, J. D. H. et al. Modelo multicriterio AHP-TOPSIS: una estrategia para evaluar alternativas de generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables. **Investigación e Innovación en Ingenierías**, v. 9, n. 2, p. 175-191, 2021.

VIANA, I. L. B.; BATISTA, J. C. M.; MACEDO SÁ, J. H.; RAMALHO, R. V. C.; LOPES, R. M.; SOUZA, D. E. S. e; MESQUITA, A. L. A. Pressure regulation and energy recovery in water distribution networks using pumps as turbines. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 58, n. 1, p. 103–113, 2023. DOI: 10.5327/Z2176-94781551.

YADAV, V.; KARMAKAR, S.; KALBAR, P. P.; DIKSHIT, A. K. PyTOPS: a python based tool for topleis. *Softwarex*. v. 9, p. 217-222, 2019. DOI: 10.1016/j.softx.2019.02.004.

YU, J.; SHEN, H.; GOU, J.; ZHANG, X. The green environment measurement by entropy method: a study based on Minnan coastal area in China. **J. Coast. Res.** 442–446, 2020. DOI: 10.2112/si103-090.1.

ZHANG, Meng-Ze; OU-YANG, Han-Qiang; JIANG, Liang; WANG, Chun-Jie; LIU, Jian-Fang; JIN, Dan; NI, Ming; LIU, Xiao-Guang; LANG, Ning; YUAN, Hui-Shu. Optimal machine learning methods for radiomic prediction models: clinical application for preoperative t2* :weighted images of cervical spondylotic myelopathy. **Jor Spine**, [S.L.], v. 4, n. 4, p. 1-9, 13 nov. 2021. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/jsp2.1178>.

.

ANEXO I – CÓDIGO TOPSIS

```
import numpy as np
class Topsis:
    def __init__(self, matriz_avalicao, criterios):
        self.matriz_avalicao = np.array(matriz_avalicao, dtype="float")
        self.criterios = np.array(criterios, dtype="float")
        self.num_linhas, self.num_colunas = self.matriz_avalicao.shape
        self.matriz_pesos = None
        self.matriz_normalizada = None
        self.matriz_normalizada_ponderada = None
        self.piores_alternativas = None
        self.melhores_alternativas = None
        self.distancia_piores = None
        self.distancia_melhores = None
        self.similaridade_piores = None
        self.similaridade_melhores = None
    def calcular_pesos(self):
        return 1
    def normalizar_matriz_decisao(self):
        soma_quadrada = np.sqrt((self.matriz_avalicao ** 2).sum(axis=0))
        self.matriz_normalizada = self.matriz_avalicao / soma_quadrada
    def calcular_matriz_normalizada_ponderada(self):
        self.matriz_normalizada_ponderada = self.matriz_normalizada *
self.matriz_pesos
    def determinar_solucoes_ideais(self):
        self.piores_alternativas = np.min(self.matriz_normalizada_ponderada,
axis=0)
        self.melhores_alternativas =
np.max(self.matriz_normalizada_ponderada, axis=0)
        for i in range(self.num_colunas):
            if not self.criterios[i]:
```

```

        self.piores_alternativas[i], self.melhores_alternativas[i] =
self.melhores_alternativas[i], self.piores_alternativas[i]
    def calcular_distancias(self):
        self.distancia_piores = np.sqrt(((self.matriz_normalizada_ponderada -
self.piores_alternativas) ** 2).sum(axis=1))
        self.distancia_melhores = np.sqrt(((self.matriz_normalizada_ponderada
- self.melhores_alternativas) ** 2).sum(axis=1))
    def calcular_similaridade(self):
        self.similaridade_piores = self.distancia_piores / (self.distancia_piores
+ self.distancia_melhores)
        self.similaridade_melhores = self.distancia_melhores /
(self.distancia_piores + self.distancia_melhores)
    def ranquear(self, similaridades):
        return [i + 1 for i in similaridades.argsort()]
    def ranquear_para_similaridade_piores(self):
        return self.ranquear(self.similaridade_piores)
    def ranquear_para_similaridade_melhores(self):
        return self.ranquear(self.similaridade_melhores)
    def calcular(self):
        self.matriz_pesos = self.calcular_pesos()
        self.normalizar_matriz_decisao()
        self.calcular_matriz_normalizada_ponderada()
        self.determinar_solucoes_ideais()
        self.calcular_distancias()
        self.calcular_similaridade()

        print("Passo 1\n", self.matriz_avaliacao, end="\n\n")
        print("Passo 2\n", self.matriz_normalizada, end="\n\n")
        print("Passo 3\n", self.matriz_normalizada_ponderada, end="\n\n")
        print("Passo 4\n", self.piores_alternativas, self.melhores_alternativas,
end="\n\n")
        print("Passo 5\n", self.distancia_piores, self.distancia_melhores,
end="\n\n")

```

```

        print("Passo 6\n", self.similaridade_piores, self.similaridade_melhores,
end="\n\n")

def imprimir_matriz_avaliacao(self):
    print("Matriz de Avaliação por Linhas:")
    for i in range(self.matriz_avaliacao.shape[0]):
        linha_formatada = [int(x) if x.is_integer() else x for x in
self.matriz_avaliacao[i, :]]
        print(f"Cenário {i + 1}: {linha_formatada}")
matriz_avaliacao = [
]
criterios = [True, True, True, True]
topsis = Topsis(matriz_avaliacao,criterios)
topsis.calcular()
print("Ranking para Similaridade com Piores Condições:",
topsis.ranquear_para_similaridade_piores())
print("Ranking para Similaridade com Melhores Condições:",
topsis.ranquear_para_similaridade_melhores())
topsis.imprimir_matriz_avaliacao()

```

ANEXO II – SÍNTESE DE CÓDIGOS DA INTERFACE DE USUÁRIO

HTML

```
<div style="margin: 0;">
  <p-card header="PayBack Baseado em Recuperação de Energia">
    <div class="card flex flex-wrap gap-3 p-fluid">
      <p-card header="">
        <div class="flex-auto">
          <label>Vazão em m3/s</label>
          <input plInputText [(ngModel)]="q" />
        </div>
        <div class="flex-auto">
          <label for="minmaxfraction">Altura manométrica em
metros.</label>
          <input plInputText [(ngModel)]="h" />
        </div>
        <div class="flex-auto">
          <label for="minmaxfraction">Eficiência da BFT.</label>
          <input plInputText [(ngModel)]="n" />
        </div>
        <div class="flex-auto">
          <label for="minmaxfraction">Horas de operação por
dia.</label>
          <input plInputText [(ngModel)]="horasOperacao" />
        </div>
        <div class="flex-auto">
          <label for="minmaxfraction">Dias de operação por
ano.</label>
          <input plInputText [(ngModel)]="diasAno" />
        </div>
        <div class="flex-auto">
          <label for="minmaxfraction">Tarifa de energia em
R$/kWh.</label>
```

```

        <input pInputText [(ngModel)]="tarifaEnergia" />
    </div>
    <div class="flex-auto">
        <label for="minmaxfraction">Custo inicial em R$</label>
        <input pInputText [(ngModel)]="investimentoInicial" />
    </div>
    <div class="flex-auto button">
        <button pButton pRipple label="Calcular"
(click)="calcularEnergiaPotencial(rho, g, q, h, n)"
        class="p-button-success">
    </button>
    </div>
    @if(resultadoEnergiaPotencial){
    <div class="flex-auto">
        <h4>Potência gerada: {{resultadoEnergiaPotencial | number:
'1.2-2'}}W</h4>
    </div>
    }
    @if(resultadoEnergiaDiaria){
    <div class="flex-auto">
        <h4> Produção de Energia Diária = {{resultadoEnergiaDiaria |
number: '1.2-2'}} kWh</h4>
    </div>
    }
    @if(resultadoBeneficioAnual){
    <div class="flex-auto">
        <h4> Benefício Anual: R$ {{resultadoBeneficioAnual | number:
'1.2-2'}}</h4>
    </div>
    }
    @if(resultadoPayback){
    <div class="flex-auto">

```

```
        <h4> Tempo de Retorno (Payback): {{resultadoPayback |
number: '1.2-2'}} anos</h4>
        </div>
    }

    </p-card>
</div>
</p-card>
</div>
```

CSS

```
.button{
  margin-top: 18px;
}

.tolbar{
  width: 100%;
  height: 70px;
  background-color: #4caf50;
  color: white;
  margin-top: -20px;
}

h2{
  padding-top: 20px;
  padding-left: 10px;
}

.card{
  margin-top: 20px;
  margin-left: 10px;
}
```

TypeScript

```
import { Component, LOCALE_ID } from '@angular/core';
```

```

import { FormsModule } from '@angular/forms';
import { InputNumberModule } from 'primeng/inputnumber';
import { ButtonModule } from 'primeng/button';
import { ReplaceDotWithCommaPipe } from './numero.pipe';
import { CardModule } from 'primeng/card';
import { InputTextModule } from 'primeng/inputtext';
import { CommonModule, registerLocaleData } from '@angular/common';
import localePt from '@angular/common/locales/pt';
registerLocaleData(localePt);
@Component({
  selector: 'app-energia-portencial',
  standalone: true,
  imports: [InputNumberModule, FormsModule, ButtonModule, CardModule,
InputTextModule, CommonModule],
  templateUrl: './energia-portencial.component.html',
  styleUrls: ['./energia-portencial.component.scss'],
  providers: [
    { provide: LOCALE_ID, useValue: 'pt-BR' }
  ]
})

export class EnergiaPortencialComponent {
  q: number = 0;

  h: number = 0;

  n: number = 0;

  horasOperacao:number = 0;
  resultadoEnergiaPotencial: number = 0;
  resultadoEnergiaDiaria: number = 0;
  resultadoPayback: number = 0;
  resultadoBeneficioAnual: number = 0;

```

```

diasAno: number = 0;
tarifaEnergia: number = 0;
investimentoInicial: number = 0;
resultado: number = 0;
rho: number = 1000
g: number = 9.81

calcularEnergiaPotencial(rho: number, g: number, Q: number, H: number,
eficiencia: number): void {

    this.resultadoEnergiaPotencial = rho * g * Q * H * eficiencia;

    this.calcularProducaoDiaria(this.resultadoEnergiaPotencial,
this.horasOperacao)
}

calcularProducaoDiaria(energiaPotencial: number, horasOperacao:
number): void {

    const energiaDiaria = (energiaPotencial/1000) * horasOperacao;
    this.resultadoEnergiaDiaria = energiaDiaria ;

    this.calcularBeneficioAnual(this.resultadoEnergiaDiaria, this.diasAno,
this.tarifaEnergia)
}

calcularBeneficioAnual(energiaDiariaKWh: number, diasAno: number,
tarifaEnergia: number): void {
    // Cálculo do benefício anual
    this.resultadoBeneficioAnual = energiaDiariaKWh * diasAno *
tarifaEnergia;
}

```

```
    this.calcularPayback(this.investimentoInicial,  
this.resultadoBeneficioAnual)  
}  
  
    calcularPayback(investimentoInicial: number, beneficioAnual: number):  
void {  
    // Cálculo do payback  
    this.resultadoPayback = investimentoInicial / beneficioAnual;  
}  
}
```

Página de assinaturas



Junior Ishihara
868.009.572-91
Signatário

HISTÓRICO

- 27 mar 2025**
15:27:17  **Junior Hiroyuki Ishihara** criou este documento. (Email: jhi@ufpa.br, CPF: 868.009.572-91)
- 27 mar 2025**
15:27:19  **Junior Hiroyuki Ishihara** (Email: jhi@ufpa.br, CPF: 868.009.572-91) visualizou este documento por meio do IP 200.239.105.186 localizado em Belém - Pará - Brazil
- 27 mar 2025**
15:27:22  **Junior Hiroyuki Ishihara** (Email: jhi@ufpa.br, CPF: 868.009.572-91) assinou este documento por meio do IP 200.239.105.186 localizado em Belém - Pará - Brazil

