TOROH: Ferramenta para Otimização e Suporte à Decisão de Sistemas de Aproveitamento de Água de Chuva

Pedro Henrique de A. Silva[1], **Anderson de S. M. Gadéa**[1], **Eduardo H. B. Cohim Silva**[1]

[1]Departamento de Tecnologia – Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)
Feira de Santana – BA – Brasil

phasilva.academic@gmail.com, gadea@uefs.br, edcohim@gmail.com

Abstract. *Rainwater harvesting mitigates water scarcity in the Brazilian Semi-arid and reduces urban supply expenses. However, rigid reservoir standardization reduces efficiency, while daily simulation complexity restricts practical field use. This paper presents TOROH, a decision-support software prototype automating daily water balance simulations and optimization of Rainwater Harvesting Systems (RWHS). Built with Python (FastAPI) and React, and packaged via pywebview, TOROH operates as a portable, offline desktop tool. It implements the Yield After Spillage (YAS) model integrated with a grid search algorithm. The rural module minimizes CAPEX under a target hydraulic efficiency, while the urban module minimizes Life Cycle Cost (LCC) by simulating progressive tariffs and operational expenses (OPEX). Results demonstrate its utility as an agile decision-support instrument.*
Keywords: *Rainwater harvesting, Decision support systems, Life cycle cost, Optimization, Software engineering.*

Resumo. *O aproveitamento de água pluvial mitiga a escassez hídrica no Semiárido e reduz custos urbanos. Contudo, a padronização rígida de reservatórios reduz a eficiência dos sistemas, e a complexidade de simulações diárias limita seu uso prático no campo. Este trabalho apresenta o TOROH, um protótipo de software de suporte à decisão projetado para automatizar simulações de balanço hídrico diário e a otimização de Sistemas de Aproveitamento de Água de Chuva (SAAC). Desenvolvido em Python (FastAPI) e React, e encapsulado via pywebview, opera como ferramenta desktop portátil e offline. Implementa o modelo Yield After Spillage (YAS) com busca em grade. O módulo rural minimiza o CAPEX sob metas de eficiência hídrica, enquanto o urbano minimiza o Custo de Ciclo de Vida (LCC) com tarifas progressivas e OPEX. Os resultados comprovam sua utilidade como instrumento ágil de tomada de decisão.*
Palavras-chave: *Aproveitamento de água de chuva, Sistemas de suporte à decisão, Custo de ciclo de vida, Otimização, Engenharia de software.*

1. Introdução

A água potável constitui um recurso vital cuja gestão racional é essencial para a preservação da vida e o desenvolvimento socioeconômico. Estimativas conjuntas da OMS e do UNICEF apontam que cerca de um quarto da população global ainda carece de acesso a fontes seguras e confiáveis de abastecimento hídrico, um cenário agravado pelas mudanças climáticas e pelo crescimento urbano desordenado [WHO and UNICEF 2021]. No

Brasil, o Semiárido apresenta um desafio estrutural: embora registre chuvas anuais razoáveis, sua distribuição temporal e espacial é extremamente irregular [Marengo et al. 2018], o que, somado à elevada evapotranspiração potencial, gera severos déficits hídricos.

Uma resposta consolidada a essas vulnerabilidades são os Sistemas de Aproveitamento de Água de Chuva (SAAC), como uma importante tecnologia social de convivência com a semiaridez. Devido à sua facilidade de implementação, programas governamentais de larga escala, como o Programa Um Milhão de Cisternas (P1MC) e o Programa Uma Terra e Duas Águas (P1+2), difundiram a construção de cisternas de placas em propriedades rurais difusas [Montenegro and Montenegro 2012, Souza et al. 2021]. Contudo, o modelo de implantação dessas políticas públicas historicamente baseou-se na padronização rígida de volumes das cisternas (comumente 16 m^3 e 52 m^3), desconsiderando a variabilidade pluviométrica local e a área de captação disponível, o que compromete a eficiência hidráulica e econômica do sistema [Souza et al. 2021].

Diante dessa problemática, surge o **TOROH**, uma ferramenta computacional de suporte à decisão projetada para automatizar, de forma ágil e intuitiva, a simulação de balanço hídrico diário e a otimização de SAACs. O software atua em duas vertentes: para o uso urbano, a otimização é baseada na viabilidade econômica do sistema; para o uso rural, fundamenta-se na meta de eficiência que se deseja atingir. Desenvolvido em Python e React, o protótipo busca combinar a elegância e a portabilidade do ecossistema JavaScript com a base científica do Python. Toda essa estrutura é encapsulada de forma autônoma via *pywebview*, permitindo a realização de simulações portáteis e offline por técnicos diretamente em campo.

Frente aos trabalhos anteriores da literatura [Souza et al. 2021], as principais contribuições do TOROH consistem em: (i) evolução da modelagem de Custo de Ciclo de Vida (LCC) urbano, superando os custos fixos do modelo legado pela introdução de OPEX parametrizável por frequência e CAPEX adicional de componentes discretos; (ii) otimização simultânea de área e volume via busca em grade vetorizada; e (iii) entrega de um ecossistema de software nativo desktop para uso portátil em campo.

2. Referencial Teórico e Algoritmos

O desenvolvimento do software TOROH baseou-se na consolidação de modelos comportamentais de simulação hídrica, otimizações econômico-financeiras e revisão do estado da arte em softwares de suporte à decisão. Esta seção detalha as formulações e conhecimentos empregados para a confecção da ferramenta.

2.1. Simulação de Balanço Hídrico Diário e Modelo YAS

A simulação de reservatórios de águas pluviais pode ser realizada por meio de modelos matemáticos de balanço de massa em escala diária. Entre os modelos comportamentais, o TOROH implementa o algoritmo *Yield After Spillage* (YAS) [Fewkes 2000]. Enquanto o modelo *Yield Before Spillage* (YBS) assume que o consumo ocorre antes do extravasamento (o que tende a superestimar a disponibilidade hídrica em reservatórios pequenos), o modelo YAS contabiliza o vertimento antes da retirada diária. Essa abordagem confere ao YAS um caráter mais conservador e seguro para o dimensionamento, sendo amplamente recomendado para sistemas onde a água pluvial representa a fonte primária ou exclusiva de abastecimento [Fewkes 2000, Giffoni and Cohim 2019].

O volume captado pelo sistema no dia t (Q_t, em litros) depende da precipitação diária (P_t, em mm), da área de captação (A, em m^2) e do coeficiente de escoamento superficial (C), conforme expresso na Equação 1:

$$Q_t = P_t \cdot A \cdot C \tag{1}$$

A simulação do balanço hídrico diário calcula a quantidade de água efetivamente consumida (Y_t, em litros) e o volume útil armazenado no final do dia (V_t, em litros) utilizando as seguintes equações dinâmicas de transição de estado [Fewkes 2000, Souza et al. 2021]:

$$Y_t = \min\{D_t,\, V_{t-1} + \theta \cdot Q_t\} \tag{2}$$

$$V_t = \min\{V_{t-1} + Q_t - Y_t,\, R - (1-\theta) \cdot Y_t\} \tag{3}$$

Onde D_t é a demanda diária requerida (litros/dia), R representa a capacidade física máxima do reservatório (litros) e θ ($0 \leq \theta \leq 1$) é o parâmetro de sensibilidade de enchimento do tanque configurável pelo usuário, adotando-se $\theta = 0,6$ como valor de referência recomendado pela literatura para simulações diárias [Fewkes 2000].

A eficiência global de atendimento do sistema (E_A, em %), que expressa a proporção da demanda total atendida pelo SAAC ao longo do período de análise de n dias, é calculada pela Equação 4:

$$E_A = \left(\frac{\sum_{t=1}^{n} Y_t}{\sum_{t=1}^{n} D_t} \right) \cdot 100 \tag{4}$$

2.2. Parâmetros de Entrada e Variáveis Comuns

Para que a simulação do balanço hídrico diário ocorra de forma agnóstica ao ambiente de implantação (rural ou urbano), o protótipo TOROH compartilha uma base comum de dados de engenharia. Os parâmetros de entrada exigidos pelo motor de cálculo englobam: (i) **Série Temporal de Precipitação (P_t)**, vetor com a lâmina de chuva diária (mm) obtida de bases históricas de estações meteorológicas; (ii) **Área de Captação (A)**, dimensão do telhado ou calçadão (m^2) disponível para interceptar a precipitação; (iii) **Volume de Armazenamento (V)**, capacidade da cisterna ou reservatório (L) a ser dimensionado; (iv) **Coeficiente de Escoamento (C)**, coeficiente adimensional (*runoff*) que quantifica perdas iniciais por absorção na cobertura (ex: $0,8$ para telhas cerâmicas e concreto); (v) **Sensibilidade de Enchimento (θ)**, parâmetro adimensional que dita a sincronia entre chuva e consumo diário; e (vi) **Demanda Requerida (D_t)**, vetor de consumo diário (L/dia), modelado como constante residencial no meio urbano ou variável para representar ciclos de irrigação agrícola e dessedentação animal no meio rural [Souza et al. 2021].

2.3. Estrutura de Custos Avançada: CAPEX Adicional e OPEX

Uma das principais limitações das modelagens acadêmicas anteriores [Souza et al. 2021] era a restrição dos custos de implantação (CAPEX) unicamente às equações contínuas

de telhado e cisterna, omitindo despesas operacionais recorrentes. O protótipo atual do TOROH introduz uma estrutura de custos dinâmicos parametrizáveis pelo usuário, embasada na teoria de Engenharia Econômica [Blank and Tarquin 2012], dividida em três pilares: (i) **CAPEX Base (Infraestrutura)**, composto pelos custos de construção do telhado ($C_{\text{Área}}$) e do reservatório (C_{Vol}) calculados via regressão regional ou catálogos comerciais; (ii) **Componentes de Instalação (CAPEX Adicional)**, que permite incluir elementos físicos discretos indispensáveis ao funcionamento do sistema (bombas d'água, sistemas de filtragem física, calhas de aço e encanamentos), cujo custo é dado por $C_{\text{Componentes}} = \sum_{k=1}^{m}(\text{Quantidade}_k \cdot \text{Preço_Unitário}_k)$; e (iii) **Despesas Operacionais Recorrentes (OPEX)**, que modela despesas periódicas de manutenção ao longo da vida útil do projeto (pastilhas de cloro, limpeza de calhas, energia de bombeamento) convertidas em custo equivalente anual para a análise de ciclo de vida. Essa nova modelagem financeira permite que as saídas econômicas geradas pelo protótipo (VPL, Payback Descontado e LCC) apresentem maior aderência à realidade prática de mercado do que as estimativas estritamente teóricas do modelo original [Blank and Tarquin 2012].

2.4. Lógica do Algoritmo e Laço de Otimização

O processamento das simulações e a busca pelo ponto ótimo do sistema são executados por meio de *loops* de simulação diária vetorizada estruturados no *backend*. O algoritmo de otimização opera sob a lógica de busca em grade (*grid search*). Essa abordagem foi adotada por garantir a identificação do ótimo global em espaços de busca discretos, atuando tanto na varredura de passos $(\Delta A, \Delta V)$ quanto na seleção entre itens de catálogos comerciais [Semaan et al. 2020]. O processo ocorre em três etapas lógicas:

1. **Inicialização e Entrada:** O sistema recebe e valida as séries de precipitação, demandas e restrições econômicas (CAPEX/OPEX). O usuário define a grade de busca parametrizando os limites e passos de incremento para Área ($[A_{\min}, A_{\max}]$, passo ΔA) e Volume ($[V_{\min}, V_{\max}]$, passo ΔV), ou simplesmente opta pelo uso de itens de um catálogo de mercado com preço fixado.
2. **Varredura de Grade (Grid Search):** O motor de cálculo executa um duplo *laço* de repetição. Para cada combinação discreta de Área (A) e Volume (V) na grade, o algoritmo calcula o balanço hídrico diário ao longo de todo o horizonte histórico de dados de chuva (ex: 20 anos), computando a eficiência de atendimento hidráulico (E_A), o extravasamento e a necessidade residual de abastecimento externo.
3. **Seleção e Otimização:**
    - **No Cenário Rural:** O algoritmo filtra todas as combinações que atendem à meta técnica estabelecida ($E_A \geq E_{\text{Alvo}}$) e seleciona o par $(A_{\text{opt}}, V_{\text{opt}})$ que gera o menor investimento inicial (CAPEX de obras).
    - **No Cenário Urbano:** O algoritmo calcula a conta de água com a concessionária para o consumo residual mensal. A economia gerada é consolidada com o OPEX e o CAPEX em um fluxo de caixa descontado a valor presente para determinar o Custo de Ciclo de Vida (LCC) de cada ponto, selecionando a configuração que minimiza o LCC global.

2.5. Trabalhos Correlatos

Na literatura nacional de suporte à decisão em SAACs, destaca-se o software *Netuno 4* [Ghisi and Cordova 2014], desenvolvido no âmbito do LabEEE/UFSC. O *Netuno 4* realiza a simulação diária de balanço de massa para edificações urbanas e determina o volume

ideal de reservatório por meio de critérios empíricos de variação marginal da eficiência ($\Delta\%/m^3$).

O TOROH avança em relação ao estado da arte representado pelo *Netuno 4* ao introduzir: (i) otimização acoplada de Área e Volume orientada pela minimização do Custo de Ciclo de Vida (LCC), integrando CAPEX adicional e despesas operacionais recorrentes (OPEX) trazidas a valor presente sob tarifas progressivas de água; (ii) suporte dual a cenários urbanos e rurais, incorporando demandas agrícolas sazonais e metas de eficiência hidráulica; e (iii) ecossistema de software portátil desktop em *FastAPI* e *React* encapsulado via *pywebview*, dispensando instalações complexas para uso em campo.

3. Metodologia e Arquitetura do Projeto

Esta pesquisa caracteriza-se como aplicada e de abordagem quantitativa, utilizando procedimentos de modelagem computacional e estudo de caso para o desenvolvimento e validação da ferramenta. O protótipo TOROH adota uma arquitetura cliente-servidor desacoplada, composta por um *frontend* em *Single Page Application* (SPA) e uma API de serviços no *backend*, integrados e empacotados localmente para execução desktop nativa de alta performance e portabilidade offline.

3.1. Arquitetura e Tecnologias (FastAPI, React e pywebview)

O *backend* do software foi desenvolvido em Python utilizando o framework *FastAPI* com validação de contratos de dados via *Pydantic*. Para viabilizar a análise ágil de décadas de dados climáticos diários, as rotinas hidráulicas de balanço de massas e busca em grade foram vetorizadas utilizando a biblioteca *Pandas*, o que elimina *loops* iterativos pesados e garante respostas computacionais mais rápidas. A geração e compilação do relatório técnico descritivo em PDF ocorrem de forma dinâmica no *backend* por meio do pacote *fpdf2*.

A interface gráfica reativa do *frontend* foi implementada em JavaScript utilizando a biblioteca *React*, comunicando-se de forma assíncrona com o *backend* por meio do cliente HTTP *Axios* e renderizando as curvas de sensibilidade em tempo real utilizando o *Recharts*.

Para que a simulação possa ocorrer de forma autônoma e offline no campo por técnicos e projetistas, utiliza-se a biblioteca *pywebview*. Esta atua como um invólucro desktop nativo que aproveita o renderizador do próprio sistema operacional. Essa decisão de engenharia garante um executável de baixo consumo de memória RAM e tamanho reduzido quando comparado a alternativas como o *Electron*, renderizando os arquivos estáticos do *React* e inicializando o servidor *FastAPI* em segundo plano sem a necessidade de terminais ou instalação de dependências externas pelo usuário final.

3.2. Desenvolvimento Assistido e Validação de Refatoração

A engenharia do protótipo foi conduzida no ambiente integrado (IDE) *Visual Studio Code* (VS Code) utilizando a técnica de programação assistida por Inteligência Artificial (*AI-assisted programming*) com o modelo generativo *Google Gemini 3.5 Flash*. A IA atuou como um copiloto (*copilot*) de desenvolvimento, sendo empregada em sessões de *brainstorming* para a concepção da arquitetura, no suporte ao entendimento e análise da base

legada de código, na geração de documentação/comentários e no rascunho de rotinas secundárias. Todo o código sugerido pela IA foi obrigatoriamente revisado e validado pelo autor antes da integração ao repositório, combinando celeridade na escrita de código repetitivo com controle humano de qualidade.

Seguindo as boas práticas de refatoração consagradas na literatura [Fowler 2018], a migração estrutural da base legada de cálculo para a nova *stack* do TOROH foi respaldada por testes de regressão e paridade automatizados. Foram criados scripts de teste para submeter os mesmos dados de entrada aos dois motores de simulação, garantindo que o novo ecossistema de software não inserisse desvios matemáticos ou erros de precisão nas equações comportamentais já validadas academicamente na literatura hídrica de referência [Giffoni and Cohim 2019, Souza et al. 2021].

4. Resultados e Discussão

Nesta seção, são demonstrados os resultados práticos obtidos pelo protótipo TOROH. Primeiramente, detalham-se os parâmetros de configuração e tarifas empregados no sistema. Em seguida, apresenta-se uma simulação do módulo rural para validação de paridade matemática com o modelo de dimensionamento de referência [Souza et al. 2021]. Por fim, descreve-se o funcionamento prático do módulo urbano utilizando dados e imagens da interface, o demonstrativo financeiro gerado em PDF, além das avaliações empíricas de desempenho computacional e usabilidade.

4.1. Parametrização e Configurações de Projeto

Para garantir que o suporte à decisão ocorra com o maior grau de fidelidade possível à realidade de mercado, o protótipo TOROH inicializa as simulações consumindo um conjunto de dados de configuração econômica e de engenharia detalhados. A Tabela 1 apresenta a síntese dos parâmetros financeiros, tarifas de água da concessionária e custos de infraestrutura cadastrados para as simulações deste trabalho.

Tabela 1. Parametrização e Configurações Iniciais Cadastradas no Protótipo

Categoria	Componente / Parâmetro	Valor / Preço (R$)	Frequência / Detalhes
Tarifas de Água	Custo Fixo Mínimo (6 m^3)	43,23	Cobrança mínima mensal
	Taxa de Esgoto Coletado	80% (0,8)	Aplicado sobre consumo de água
	Faixa Progressiva 1 (10 m^3)	1,71 /m^3	Tarifa para consumo básico
	Faixa Progressiva 2 (15 m^3)	12,10 /m^3	Tarifa para consumo moderado
	Faixa Progressiva 3 (20 m^3)	12,95 /m^3	Tarifa para consumo elevado
	Faixa Progressiva 4 (25 m^3)	14,56 /m^3	Tarifa para consumo excessivo
	Faixa Progressiva Excedente	16,29 /m^3	Consumo acima de 25 m^3
Catálogos Comerciais	Cobertura de Mercado (50 m^2)	4.500,00	Custo de aquisição total
	Cobertura de Mercado (100 m^2)	8.500,00	Custo de aquisição total
	Reservatório Comercial 310 L	625,00	Custo de aquisição total
	Reservatório Comercial 500 L	687,50	Custo de aquisição total
	Reservatório Comercial 1.000 L	875,00	Custo de aquisição total
	Reservatório Comercial 2.000 L	2.281,25	Custo de aquisição total
	Reservatório Comercial 5.000 L	4.812,50	Custo de aquisição total
	Reservatório Comercial 10.000 L	9.687,50	Custo de aquisição total
	Reservatório Comercial 20.000 L	18.125,00	Custo de aquisição total
Acessórios (CAPEX)	Taxa de Mobilização (1 un.)	1.360,00	Custo fixo inicial de obras
	Calha PVC (15 metros)	25,00/metro	Tubulação e conexões perimetrais
	Bomba d'água perimetral (1 un.)	300,00	Equipamento de recalque
Operação (OPEX)	Energia Elétrica do Recalque	3,00	Frequência: Mensal (1 em 1 mês)
	Manutenção Preventiva do Tanque	100,00	Frequência: Anual (12 em 12 meses)

4.2. Cenário Rural e Validação de Paridade (Prova de Conceito)

A validação do módulo rural foi conduzida replicando as condições operacionais do estudo de caso para o município de Ibotirama-BA [Souza et al. 2021], funcionando como uma prova de conceito do motor de cálculo. O cenário de teste consistiu no dimensionamento de um SAAC de custo mínimo capaz de suprir, com no mínimo 95% de eficiência de atendimento, uma demanda doméstica diária de 120 L/dia, adotando coeficiente de escoamento $C = 0{,}8$ (80%) e sensibilidade de enchimento $\theta = 0,6$. A Tabela 2 apresenta a comparação direta entre os resultados ótimos publicados no artigo de referência e os gerados pelo TOROH.

Tabela 2. Comparação de Resultados Ótimos para Ibotirama ($D = 120$ L/dia, $E \geq 95\%$)

Indicador de Dimensionamento	Artigo de Referência GESTA [Souza et al. 2021]	Protótipo TOROH (Módulo Rural)
Precipitação Média Anual (P)	707,80 mm	720,32 mm
Grau de Concentração (GCP)	0,635	0,6078
Área de Captação Ideal (A)	80,0 m²	80,0 m²
Volume de Reservatório Ideal (V)	26,9 m³ (26.900 L)	27,0 m³ (27.000 L)
Eficiência Atendida Realizada (E_A)	95,00% (Mínimo)	95,11%
Fração de Demanda (F_D)	0,757	0,757
Fração de Reservação (F_R)	0,466	0,466
Investimento Estimado (CAPEX puro)	R$ 14.640,00	R$ 14.787,06

A comparação dos dados (Tabela 2) evidencia a consistência do novo motor com o modelo de referência. O TOROH determinou que o menor investimento consiste em uma área de captação de $80,0$ m² e volume útil de 27.000 L ($27,0$ m³), operando com eficiência de $95,11\%$. Os adimensionais ótimos de Fração de Demanda ($F_D = 0{,}757$) e Fração de Reservação ($F_R = 0,466$) convergiram exatamente com os valores do artigo original [Souza et al. 2021].

A diferença mínima observada no volume ideal (27.000 L no TOROH contra os 26.900 L do artigo) e, consequentemente, no custo total ($R\$\,14.787{,}06$ contra $R\$\,14.640{,}00$) ocorre porque a versão anterior do simulador computava as simulações baseando-se em anos fixos de exatamente 365 dias. No novo protótipo do TOROH, o balanço de massa diário foi refatorado para considerar o calendário astronômico de $365{,}25$ dias por ano. Essa mudança corrige as distorções de anos bissextos ao longo das décadas de série histórica, alterando de forma milimétrica a precipitação média anual de Ibotirama para $720{,}32$ mm e causando toda a leve diferença observada nos dados, além do impacto natural da busca discretizada com passos de incremento de 1.000 L configurados no software.

4.3. Cenário Urbano

Para a demonstração prática do protótipo funcional, optou-se por apresentar o fluxo de interação inicial de uso da ferramenta. Inicialmente, acessou-se a página de configurações do TOROH (Figura 1). O menu de parametrização funciona de forma semelhante em todas as abas: à esquerda a barra lateral (*sidebar*) indica os módulos configuráveis, e à direita exibem-se os campos alteráveis. Selecionou-se a tela do "Catálogo de Captação", na qual cada linha representa um item comercial facilmente adicionado ou removido pelo usuário.



Figura 1. Interface de cadastro do catálogo de captação comercial do TOROH.

Com todas as variáveis configuradas, prosseguiu-se para a otimização urbana, executada no modo "Catálogo" (Figura 2). A principal diferença em relação ao modo "Fórmula" consiste em que o método por fórmula exige que o projetista insira os limites e intervalos de busca para o algoritmo de busca em grade (*grid search*), enquanto o modo Catálogo limita-se às opções físicas comerciais cadastradas.

O diagnóstico urbano foi processado com a série histórica diária de Feira de Santana-BA (FSA) de 01/01/1998 a 31/12/2012 (15 anos, 5.479 registros), retornando GCP $= 0{,}1296$ e precipitação média de $695{,}42$ mm. Definiram-se: *runoff* de 80% ($C = 0{,}8$), sensibilidade de 60% ($\theta = 0,6$), demanda não potável de 520 L/dia (correspondente especificamente à fração de consumo de água não potável estimada para uma residência padrão de 4 ocupantes), horizonte de 20 anos e TMA de 5% a.a. A infraestrutura existente foi configurada com área de 80 m^2 e volume nulo.



Figura 2. Painel "Diagnóstico Urbano" exibindo os resultados da simulação e gráficos em tempo real.

O painel de diagnóstico (Figura 2) consolidou o ponto ótimo comercial em 1.000 L de reservatório e 80 m^2 de captação, demandando um investimento inicial de $R\$\,2.910{,}00$. A economia mensal média alcançou $R\$\,53{,}57$, com Custo de Ciclo de Vida (LCC) mínimo de $R\$\,27.548{,}29$. O software plota simultaneamente três gráficos de comportamento econômico com o Eixo X representando a capacidade comercial simulada (0 a 20.000 L): (i) **Custo de Ciclo de Vida (LCC)**, cujo valor declina com a economia de água atingindo o custo mínimo em 1.000 L, voltando a subir para volumes maiores devido ao investimento em tanques mais caros; (ii) **Resultado Líquido (VPL)**, que evidencia graficamente o

pico de retorno líquido acumulado no ponto ideal recomendado; e (iii) **Tempo de Retorno (Payback)**, que traça a curva descontada de quitação do investimento ao longo das capacidades.

Para consolidar as informações do projeto de forma unificada, a Tabela 3 compila os principais indicadores hidráulicos e econômicos gerados no "Relatório de Viabilidade Econômica" impresso em PDF pelo protótipo.

Tabela 3. Resumo dos Indicadores Econômicos e Investimento Inicial do PDF

Indicadores de Viabilidade (Descontados)		**Composição do Investimento Inicial (CAPEX)**	
Investimento (CAPEX) a VP:	$R\$\,2.910{,}00$	Expansão Cisterna:	$R\$\,875{,}00$
Custo O&M (OPEX) a VP:	$R\$\,1.705{,}05$	Taxa de Mobilização:	$R\$\,1.360{,}00$
Benefício Total (Economia) a VP:	$R\$\,9.926{,}03$	Calha PVC (15 metros):	$R\$\,375{,}00$
Relação Custo/Benefício (B/C):	$2,15$	Bomba d'água:	$R\$\,300{,}00$
Taxa Interna de Retorno (TIR):	$24{,}54\%$ ao ano	**Total CAPEX Nominal:**	**R$ 2.910,00**
Tempo de Retorno (Payback):	62 Meses (Jul/2031)	**Insumos Recorrentes (OPEX)**	
VPL Líquido Final (Ano 21):	**R$ 5.310,98**	Energia / Manutenção:	$R\$\,3{,}00$/mês / $R\$\,100{,}00$/ano

A análise da Tabela 3 comprova a viabilidade do projeto urbano. O investimento é amortizado em 62 meses, gerando TIR de $24{,}54\%$ a.a., relação B/C de $2{,}15$ e VPL líquido acumulado de $R\$\,5.310{,}98$ ao final do horizonte simulado.

4.4. Desempenho Computacional e Validação de Usabilidade

Para comprovar empiricamente a agilidade computacional da ferramenta, realizaram-se testes de estresse com $N = 100$ repetições para a otimização de Custo de Ciclo de Vida (LCC) sobre uma série temporal sintética de 20 anos de dados pluviométricos diários (7.305 registros). A varredura exaustiva da grade de busca de 121 combinações de área e volume apresentou um tempo médio de processamento de apenas $490{,}23 \pm 7{,}59$ ms no motor de cálculo interno e $494,81 \pm 7,68$ ms no *endpoint* completo da API (incluindo validação *Pydantic* e sanitização de dados). Esses resultados comprovam que a estratégia de busca em grade vetorizada em *Pandas* é computacionalmente ágil e suficiente para os cenários do projeto, fornecendo análises de sensibilidade complexas em frações de segundo.

Visando validar empiricamente a usabilidade e a percepção da interface do protótipo, aplicou-se uma avaliação qualitativa e quantitativa com 13 discentes e pesquisadores de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS). Todos os participantes (100%) concluíram com êxito as tarefas de dimensionamento e otimização propostas, classificando a ferramenta como de fácil navegação e de resultados compreensíveis, recomendando o seu uso profissional. Dentre os pontos fortes citados, sobressaiu-se a clareza do relatório financeiro e do *dashboard* em tempo real. As oportunidades de melhoria identificadas (como a inclusão de legendas explícitas nos eixos dos gráficos e botões de ajuda explicativos nos parâmetros) foram mapeadas para o ciclo de refinamento do protótipo.

5. Conclusões e Próximos Passos

O protótipo TOROH demonstrou ser uma solução viável e matematicamente robusta para o suporte à decisão em SAACs. Ao integrar simulações diárias de balanço de massa

(YAS) com *solvers* financeiros de Custo de Ciclo de Vida (LCC), a ferramenta une o rigor acadêmico às necessidades da engenharia de campo. A automação de análises de sensibilidade em milissegundos fornece indicadores claros (VPL, TIR e Payback Descontado) para respaldar investimentos sustentáveis e descentralizados.

Atualmente, o código-fonte e o executável do protótipo encontram-se em trâmite de registro de propriedade intelectual junto ao núcleo de inovação tecnológica da universidade, podendo ser disponibilizados pelos autores mediante solicitação direta para fins de pesquisa e cooperação acadêmica.

Como perspectivas futuras de desenvolvimento, destacam-se a incorporação contínua de melhorias de interface (UX/UI) sugeridas na avaliação de usabilidade, a automação interna do cálculo de lâminas de água para irrigação agrícola e a integração com APIs públicas para requisição automática de dados pluviométricos (ANA/INMET).

Referências

Blank, L. and Tarquin, A. (2012). *Engineering Economy*. McGraw-Hill, New York, 7th edition.

Fewkes, A. (2000). Modelling the performance of rainwater collection systems: towards a generalised approach. *Urban Water*, 1(4):323–333.

Fowler, M. (2018). *Refactoring: improving the design of existing code*. Addison-Wesley Professional, Boston, 2nd edition.

Ghisi, E. and Cordova, M. M. (2014). Netuno 4: Manual do usuário. Technical report, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis.

Giffoni, V. V. and Cohim, E. (2019). Otimização de volumes de reservatórios de água da chuva para uso pecuário. *Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA)*, 7(2):151–159.

Marengo, J. A., Alves, L. M., Alvala, R. C. S., Cunha, A. P., Brito, S., and Moraes, O. L. L. (2018). Climatic characteristics of the 2010–2016 drought in the semi-arid Northeast Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 90(2):1973–1985.

Montenegro, A. A. A. and Montenegro, S. M. G. L. (2012). Olhares sobre as políticas públicas de recursos hídricos para o semiárido. In Gheyi, H. R., Paz, V. P. S., Medeiros, S. S., and Galvão, C. O., editors, *Recursos Hídricos em Regiões Semiáridas: estudos e aplicações*, pages 2–24. INSA, Campina Grande.

Semaan, M., Day, S. D., Garvin, M., Ramakrishnan, N., and Pearce, A. (2020). Optimal sizing of rainwater harvesting systems for domestic water usages: a systematic literature review. *Resources, Conservation & Recycling: X*, 6:100033.

Souza, A. C. B. L., Araújo, J. F., Gadéa, A. S. M., and Cohim, E. (2021). Otimização de sistemas de aproveitamento de água de chuva para fins domésticos em áreas rurais. *Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA)*, 9(2):175–192.

WHO and UNICEF (2021). Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2020: Five years into the SDGs. Technical report, World Health Organization (WHO) and United Nations Children's Fund (UNICEF), Geneva.