



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANA IACY DOMINGOS PONTES

**SISTEMA DE APROVEITAMENTO PLUVIAL E VALIDAÇÃO DE SENSORES PARA
MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA EM TEMPO REAL**

Recife
2023

ANA IACY DOMINGOS PONTES

**SISTEMA DE APROVEITAMENTO PLUVIAL E VALIDAÇÃO DE SENSORES PARA
MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA EM TEMPO REAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientadora: Prof^a. Dra. Sávia Gavazza dos Santos Pêssoa.

Coorientadora: Prof^a. Dra. Edna Natividade da Silva Barros.

Recife

2023

Catalogação na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

P814s Pontes, Ana Iacy Domingos.

Sistema de aproveitamento pluvial e validação de sensores para monitoramento da qualidade da água em tempo real / Ana Iacy Domingos Pontes, 2023.

77 f.: il.

Orientadora: Profa. Dra. Sávia Gavazza dos Santos Pêsoa.

Coorientadora: Profa. Dra. Edna Natividade da Silva Barros.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2023.

Inclui referências e apêndices.

1. Engenharia civil. 2. Sistema de captação pluvial. 3. Economia. 4. Segurança hídrica. 5. Ambiente urbano e sensores alternativos. I. Pessoa, Sávia Gavazza dos Santos (Orientadora). II. Barros, Edna Natividade da Silva (Coorientadora). III. Título.

ANA IACY DOMINGOS PONTES

**SISTEMA DE APROVEITAMENTO PLUVIAL E VALIDAÇÃO DE SENSORES PARA
MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA EM TEMPO REAL**

Dissertação em Engenharia Civil da
Universidade Federal de Pernambuco, Centro
de Tecnologia e Geociências, como requisito
para obtenção do título de Mestra em
Engenharia Civil. Área de concentração:
Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovada em 21/06/2023.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Sávia Gavazza dos Santos Pêsoa - UFPE

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Edna Natividade da Silva Barros - UFPE

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência

Prof^a. Dr^a. Sylvana Melo dos Santos (examinadora interna)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência

Prof^a. Dr^a. Nélia Henriques Callado (examinadora externa)
Universidade Federal de Alagoas

participação por videoconferência

Prof^a. Dr^a. Shyrlane Torres Soares Veras (examinadora externa)
Universidade Federal de Pernambuco

*Ao meu noivo, pais, irmã e,
àqueles que passaram pelo meu caminho ao longo dessa jornada*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder força e resiliência durante todo o mestrado, principalmente nos momentos tristes.

À Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) pela bolsa de pesquisa ao longo do mestrado.

Aos meus pais e irmã, Tereza, Tadeu e Vitória, por todo apoio, carinho, cuidado e amor, ao longo dos anos.

Ao meu noivo, pelo cuidado, carinho e incentivo durante todo o processo de escrita.

Às minhas orientadoras, Sávia Gavazza e Edna Barros, que incentivaram e apoiaram o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas de pesquisa, que ao longo dos anos dividiram os problemas e as conquistas acerca do estudo sobre a água de chuva.

A todos os amigos que de alguma forma colaboraram com a entrega desse sonho, muito obrigada pela ajuda e apoio e por sempre estarem presentes com palavras de incentivo e energia positiva.

Aos técnicos do laboratório, por todo o suporte e auxílio ao longo dos anos.

E a todos que de alguma forma passaram pela minha vida e auxiliaram nessa jornada.

RESUMO

As questões urbanas relacionadas a alagamentos, inundações, enxurradas, deslizamentos e à intermitência do abastecimento de água são fatores cada vez mais frequentes. Os sistemas de captação e aproveitamento de água da chuva são alternativas utilizadas para o amortecimento do escoamento do escoamento superficial e para o auxílio na escassez hídrica. Esses sistemas também auxiliam na diminuição da demanda de água sobre a companhia de abastecimento público e na redução dos custos com água. Com isso, o objetivo do trabalho foi desenvolver um sistema de aproveitamento pluvial, avaliando diferentes métodos de reservação (Rippl, empírico brasileiro ou método de Azevedo Neto, empírico inglês, prático australiano), com o intuito de utilizá-la para fins potáveis. Um sistema de tratamento foi proposto e instalado para captar, desviar o primeiro milímetro e potabilizar a água de chuva em um empreendimento na zona urbana da cidade de Recife-PE, obtendo uma economia de R\$ 14.619,48 por ano com um tempo de retorno de 3,42 anos. A qualidade da água do empreendimento foi monitorada para garantir a efetividade do sistema, esta apresentou boa qualidade nas amostras coletadas após o tratamento em todos os pontos conforme previsto na legislação. Sensores de pH, temperatura e sólidos totais dissolvidos foram desenvolvidos e validados utilizando testes estatísticos para monitoramento da qualidade da água da chuva, com a finalidade de fornecer ao usuário segurança hídrica para a utilização da água pluvial como fonte de abastecimento, esses sensores demonstraram bom funcionamento na faixa delimitada para água de chuva que para STD se apresentou entre 0,0 a $62,7 \pm 4,2 \text{ mg}^{-1}$ e para pH entre $4,2 \pm 0,04$ a $8,03 \pm 0,17$.

Palavras-chave: sistema de captação pluvial; economia; segurança hídrica; ambiente urbano e sensores alternativos.

ABSTRACT

Urban problems related to flooding, flash floods, landslides and the intermittent water supply are increasingly frequent factors. The use of rainwater collection and utilization systems is an alternative used to mitigate surface runoff and assist with water scarcity. These systems also help to reduce the water demand on the utility company and lower water costs. Therefore, the objective of the work was to develop a rainwater harvesting system, evaluating different storage methods (Rippl, Brazilian empirical or Azevedo Neto's method, British empirical, Australian practical), with the intention of using it for potable purposes. A treatment system was proposed and installed to collect, divert the first millimeter and make rainwater potable in an enterprise in the urban area of Recife, a city in the state of Pernambuco, providing a total saving of R\$ 14,619.48 per year with a payback time of 3.42 years. The water quality of the enterprise was monitored to guarantee the effectiveness of the system, which showed good quality in the samples collected after treatment at all collection spots, as required by the Brazilian legislation. Sensors of pH, temperature and total dissolved solids were developed and validated using statistical tests to monitor the quality of rainwater, in order to provide the consumer water security for the use of rainwater as a supply source. These sensors have demonstrated good functioning within the designated range for rainwater, which was between 0.0 to $62.7 \pm 4.2 \text{ mg}^{-1}$ for TDS and between 4.2 ± 0.04 to 8.03 ± 0.17 for pH.

Keywords: rainwater harvesting system; savings; water security; urban environment and alternative sensors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo de cisterna rural antes (A) e depois (B) do P1MC.....	20
Figura 2 - Diagrama de um sistema de aproveitamento de água da chuva.....	22
Figura 3 - Sistema de aproveitamento de água de chuva (A e B).....	24
Figura 4 - Cálculo da área de contribuição para captação da água pluvial.....	26
Figura 5 - Dispositivo automático de desvio das primeiras águas da chuva....	35
Figura 6 - Esquema do dispositivo de desvio (A) e desvio instalado em prédio de zona urbana (B).....	35
Figura 7 - Fluxograma das etapas para a execução do trabalho.....	37
Figura 8 - Demonstrativo do empreendimento.....	39
Figura 9 - Demonstrativo do sistema.....	44
Figura 10 -Sensor Alternativo de pH, STD e temperatura.....	45
Figura 11 -Médias pluviométricas 2011- 2020.....	48
Figura 12 -Área de contribuição da cobertura.....	49
Figura 13 -Área do telhado do empreendimento.....	49
Figura 14 -Amostras de água após e antes do tratamento (COMPESA) e do controle.....	56
Figura 15 -Motobomba pressurizadora.....	57
Figura 16 -Caixa de drenagem antes (A) e depois (B).....	58
Figura 17 -Correlação entre as leituras de pH do sensor padrão-ouro 1 e 2 e alternativo.....	59
Figura 18 -Correlação entre as leituras de STD do sensor padrão-ouro e alternativo.....	60
Figura 19 -Correlação entre as leituras de temperatura do sensor padrão-ouro e alternativo.....	61
Figura 20 -Comparativo das leituras para cada sensor alternativo e o padrão-ouro de pH.....	62
Figura 21 -Comparativo das leituras para cada sensor alternativo e o padrão-ouro de STD.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficientes de Runoff médios	40
Tabela 2 - Parâmetros e métodos utilizados no monitoramento da qualidade da água	44
Tabela 3 - Volumes do reservatório pelos métodos e suas características	50
Tabela 4 - Histórico de consumo do empreendimento.....	51
Tabela 5 - Resultados físico-químicos	54
Tabela 6 - Resultados microbiológicos	54
Tabela 7 - Análise de variância (ANOVA) para dados de pH por recipiente para todos os sensores	63
Tabela 8 - Análise de variância (ANOVA) para dados de pH por recipiente para sensor amarelo e PO.....	63
Tabela 9 - Análise de variância (ANOVA) para dados de STD por recipiente para todos os sensores	65
Tabela 10 - Análise de variância (ANOVA) para dados de STD por recipiente para sensor amarelo e PO.....	65
Tabela 11 - Valores médios encontrados comercialmente dos equipamentos	67
Tabela 12 -Precificação do sensor alternativo	67

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	OBJETIVOS.....	15
2.1	GERAL.....	15
2.2	ESPECÍFICOS.....	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1	DISPONIBILIDADE HÍDRICA NO BRASIL.....	16
3.2	INUNDAÇÕES.....	17
3.3	QUALIDADE DA ÁGUA DA CHUVA.....	18
3.4	SISTEMA DE CAPTAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE ÁGUA DA CHUVA.....	21
3.4.1	Superfície de Captação.....	25
3.4.2	Transporte.....	27
3.4.3	Armazenamento.....	27
3.4.4	Viabilidade Econômica.....	32
3.5	FATORES QUE CONTRIBUEM NA FALTA DE ACEITAÇÃO DE SISTEMAS DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA DE CHUVA.....	32
3.6	PROTEÇÃO SANITÁRIA DE SISTEMAS DE CAPTAÇÃO PLUVIAL.....	33
4	METODOLOGIA.....	37
4.1	ETAPA 1. CONCEPÇÃO DO SISTEMA DE APROVEITAMENTO PLUVIAL.....	38
4.1.1	Coleta de Dados para a Concepção do Sistema de Aproveitamento Pluvial e Análise de Aproveitamento Pluvial.....	38
4.1.2	Caracterização da Área de Estudo.....	38
4.1.3	Dimensionamento de Sistema de Aproveitamento de Água Pluvial....	39
4.1.3.1	Estudo de Precipitação.....	39
4.1.3.2	Potencial de Captação.....	40
4.1.3.3	Consumo do Empreendimento Teórico.....	40
4.1.3.4	Dimensionamento de Reservatório.....	41

4.2	ETAPA 2. ANÁLISE DE APROVEITAMENTO PLUVIAL.....	41
4.2.1	Consumo do Empreendimento Real.....	41
4.2.2	Custo Adicional do Sistema.....	41
4.2.2.1	Cobrança CEEE pela energia elétrica.....	42
4.2.3	Viabilidade Econômica.....	42
4.2.4	Qualidade da Água.....	43
4.3	ETAPA 3. DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE SENSORES DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA.....	45
4.3.1	Testagem e Análise de Dados.....	46
4.3.2	Estimativa de Preço dos Sensores Alternativos.....	47
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	48
5.1	ETAPA 1. DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA DE APROVEITAMENTO ÁGUA PLUVIAL.....	48
5.1.1	Estudo de Precipitação.....	48
5.1.2	Potencial de Captação.....	48
5.1.3	Consumo do Empreendimento Teórico.....	49
5.1.4	Dimensionamento do Reservatório.....	50
5.2	ETAPA 2. ANÁLISE DO SISTEMA DE APROVEITAMENTO PLUVIAL.....	51
5.2.1	Consumo do Empreendimento Real.....	51
5.2.2	Custo Adicional do Sistema.....	51
5.2.3	Viabilidade Econômica.....	52
5.2.4	Qualidade da Água do Sistema.....	52
5.2.4.1	Resultados Físico-Químicos.....	53
5.2.4.2	Resultados Bacteriológicos.....	57
5.2.5	Gestão e Gerenciamento do Sistema.....	57
5.3	ETAPA 3. DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE SENSORES PARA MONITORAMENTO REMOTO DA QUALIDADE DA ÁGUA.....	59
5.3.1	Testagem e Análise de Dados.....	59

5.3.2	Estimativa de Preço dos Sensores Alternativos.....	66
6	CONCLUSÃO.....	68
	REFERÊNCIAS.....	70
	APÊNDICE A - HISTÓRICO DE PRECIPITAÇÃO E ACUMULADO ANUAL– POSTO VÁRZEA, RECIFE.....	76
	APÊNDICE B – VIABILIDADE ECONÔMICA.....	77

1 INTRODUÇÃO

A utilização da água da chuva é uma prática empregada há séculos e vem sendo uma alternativa aplicada como política de convivência contra a seca (LIMA, 2012). Nas áreas rurais, essa prática possui uma boa aceitação e é incentivada pela legislação brasileira a exemplo da Lei N° 9.433 (BRASIL, 1997) que incentiva a captação, preservação e aproveitamento da água pluvial.

Além disso, o acelerado crescimento populacional em diversos locais do mundo aumenta a demanda por recursos naturais. A exploração dessas fontes decorrentes do desenvolvimento urbano prejudica a qualidade dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, onerando o tratamento da água para o consumo humano. De acordo com a Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação, cerca de 40% da população mundial é afetada pela escassez hídrica e a projeção é que em 2050 esse percentual abrangerá 2/3 da sociedade (FAO, 2022, FLÖRKE; SCHNEIDER; MCDONALD, 2018). A falta de acesso à água potável atinge um a cada quatro pessoas, e quase metade não tem acesso a saneamento adequado (WHO; UNICEF, 2021).

A escassez global de água é um problema preocupante, especialmente para as gerações futuras. Tanto no Brasil quanto no mundo, o acesso à água potável e o tratamento adequado do esgoto são questões cruciais para alcançar uma sociedade mais justa e sustentável. Além disso, deparamo-nos com frequentes desafios climáticos, como enchentes e secas extremas, que agravam ainda mais a situação. A contaminação significativa dos corpos d'água também dificulta o abastecimento de água para a população (JACOBI; EMPINOTTI; SCHMIDT, 2016).

Apesar da maior oferta de água em ambientes urbanos, é perceptível a deficiência de abastecimento. O sistema convencional não supre a demanda de algumas regiões, a exemplo de Recife, que apresenta índices de 89,5% no atendimento urbano e possuem perdas na distribuição de 57,5%. Por outro lado, determinadas regiões sofrem com as consequências das chuvas (SANTOS; FARIAS, 2017; SNIS, 2022; SHABANGU; HAMAM; ADEDEJI, 2020). A pesquisa de novas tecnologias para o abastecimento de água pode promover a sustentabilidade na gestão hídrica, reduzindo os impactos ambientais (ARFELLI *et al.*, 2022).

Embora a utilização de água de chuva para fins potáveis e não potáveis no ambiente rural seja uma prática já difundida, na zona urbana ainda é perceptível uma

resistência para a utilização desse recurso para esses fins (BASHAR; KARIM, IMTEAZ, 2018).

Dessa forma, esse trabalho justifica-se na utilização de água de chuva como fonte complementar de abastecimento em ambiente urbano proporcionando uma melhoria na segurança hídrica de um empreendimento, atuando como uma maneira de fomentar a prática do aproveitamento pluvial. Para isso, foi implementado e analisado um sistema de aproveitamento de água pluvial em um empreendimento da zona urbana de Recife, Pernambuco para a utilização dessa água como fonte de abastecimento.

Além disso, o desenvolvimento de sensores de monitoramento da qualidade da água da chuva empregado no estudo atua como aliado a garantia da segurança hídrica do usuário, incentivando a autossuficiência hídrica. Foram analisados sensores de monitoramento da qualidade de água que medem pH, temperatura e STD e em paralelo a precificação deles foi realizada.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Implementar um sistema de captação, tratamento e monitoramento da qualidade da água da chuva para ser utilizado para fins potáveis em ambiente urbano.

2.2 ESPECÍFICOS

1. Implementar um sistema de aproveitamento de água pluvial em um empreendimento.
2. Avaliar o consumo do empreendimento com a utilização do sistema.
3. Avaliar a viabilidade econômica da utilização de água pluvial.
4. Monitorar a qualidade da água do empreendimento.
5. Analisar sensores de monitoramento de qualidade de água de chuva que medem pH, temperatura e STD.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 DISPONIBILIDADE HÍDRICA NO BRASIL

A gestão dos recursos hídricos se faz necessária considerando que a disponibilidade de água contemplada com saneamento ambiental, agregado ao controle da poluição hídrica difusa, está intrinsecamente relacionado com a saúde pública. A contaminação dos recursos naturais é um dos principais riscos à saúde, sendo um dos focos de propagação de doenças, sendo encontrada em sua maioria em locais com falta de saneamento (LIBÂNIO; CHERNICHARO; NASCIMENTO, 2005). As condições ambientais e climáticas estão diretamente relacionadas à distribuição de patógenos e à ocorrência de surtos de doenças transmitidas pela água (EL-SAYED; KAMEL, 2020). Estima-se que em 2015 a cólera afetou aproximadamente de 1,3 milhões a 4 milhões de casos, abrangendo 69 países globalmente (ALI *et al.*, 2015).

De acordo com as Nações Unidas, a segurança hídrica consiste na capacidade de uma população promover o acesso sustentável a quantidades adequadas de água de boa qualidade para a sua subsistência, o bem-estar humano e o desenvolvimento socioeconômico, para a proteção da saúde pública e para preservar ecossistemas em clima de paz e estabilidade política (UN, 2013).

A necessidade de uma maior utilização de água de boa qualidade em diversas atividades, corrobora para a deterioração da condição desses recursos devido a sua exploração exacerbada. O tornando cada vez mais escasso, devido à dificuldade no tratamento para consumo humano que por vezes o torna inviável.

Diante das diversas formas de utilização da água no mundo destacam-se o abastecimento, geração de energia elétrica, irrigação, navegação, limpeza das cidades, construção de obras, combate a incêndios, dentre outros. De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (2005) e Godskesen *et al.* (2013) a agricultura despende cerca de 70% da água consumida, seguida pelo setor industrial e 8% atividades domésticas.

3.2 INUNDAÇÕES

A problemática das inundações são eventos com uma ocorrência cada vez mais crescente nos grandes centros urbanos devido ao aquecimento global, mudanças climáticas (KRAMER; TERHEIDEN; WIEPRECHT, 2016) e ao crescimento populacional e à rápida urbanização (SURIYA; MUDGAL, 2010; TINGSANCHALI, 2012).

Custódio (2017) apresenta a análise dos dados de 1990 a 2015 acerca da ocorrência de inundações, foi avaliado que esses eventos dobraram em 2015, o fato é explicado pelas alterações climáticas ocorridas no planeta, aumento da população e consequente urbanização. O trabalho explica que em determinados momentos ocorre uma redução na quantidade de eventos que pode ser explicado com a adoção de políticas públicas para o controle das inundações como, por exemplo, planos de drenagem urbana.

Determinadas regiões do Brasil também sofrem com essa problemática. Custódio (2017) aborda que, no ano de 2013, o estado do Espírito Santo enfrentou graves problemas com as inundações, apresentando volumes registrados que superaram 400% os valores médios de precipitações esperados para o mês de dezembro.

De acordo com Tingsanchali (2012), para o controle adequado das inundações, devem ser considerados aspectos socioeconômicos e ambientais. Necessitando da participação das diversas partes interessadas, incluindo as autoridades, como os planejadores urbanos, civis, autoridades da defesa civil, saúde e serviços sociais. Por isso, eleva-se o interesse de verificar a possibilidade de atenuar a problemática das inundações e outras problemáticas relacionadas a chuva, e a escassez de água em grandes centros urbanos por meio do aproveitamento de água pluvial.

Ke *et al.* (2023) afirmam que a captação e armazenamento da água da chuva têm o potencial de reduzir a ocorrência de deslizamentos em áreas de morros, uma vez que as chuvas intensas são uma das principais causas desse problema. Isso ocorre devido à alteração das propriedades do solo quando fica saturado, causando uma diminuição da resistência ao movimento e um aumento na probabilidade de ocorrência de deslizamentos (CHEN; ZHANG, 2014).

A utilização da água da chuva apresenta um grande potencial para reduzir os picos de vazão de precipitação, bem como diminuir a ocorrência de enchentes e alagamentos (FRENI; LIUZZO, 2019).

3.3 QUALIDADE DA ÁGUA DA CHUVA

A água presente nas nuvens provém da evaporação de águas superficiais de lagos, rios e mares, portanto, sem sais, particulados e microrganismos. A precipitação desse volume de água é excelente para vários usos, como abastecimento humano, com exceção de regiões com elevadas concentrações de poluentes atmosféricos, como localidades com uma densidade populacional elevada ou industrializadas (CARDOSO; SILVA; PÁDUA, 2005).

A contaminação ocorre quando a água entra em contato com os poluentes presentes nas camadas mais baixas da atmosfera e tem como influência a superfície de captação e a forma de armazenamento dessa água. O caminho da água pela camada mais próxima ao solo transporta partículas em suspensão e microrganismos, e escoam sobre a superfície de captação carreando todas as partículas depositadas nessa superfície nos intervalos de precipitação (CARDOSO; SILVA; PÁDUA, 2005).

Andrade Neto (2013) afirma que a presença de metais pesados são mais prováveis em localidades com elevado tráfego ou proximidade de indústrias, além de compostos como praguicidas e herbicidas que quando em elevada concentração pode contaminar a água da chuva, porém, mesmo nessas regiões a qualidade da água possui bons parâmetros químicos como, dureza, salinidade, alcalinidade.

Vários estudos sobre a qualidade da água de chuva armazenadas em cisternas concluíram que a mesma atende aos padrões de potabilidade exigidos pela Organização Mundial de Saúde referente aos parâmetros físico-químicos, encontrando divergência apenas com relação aos critérios microbiológicos, sendo então susceptíveis à contaminação por microrganismos patogênicos, necessitando de uma maior frequência de monitoramento (GOULD; NISSEN-PETERSEN, 2002; VIDAL, 2010).

A composição química da água de chuva é influenciada pelas condições meteorológicas locais. A precipitação é classificada como ácida com um pH em torno de 4,2, devido à presença de sulfato e nitrato, majoritariamente sendo as suas contribuições de 80% e 20%, respectivamente, estes decorrentes da queima de

biomassa (HU *et al.*, 2003). Lima (2012) afirma que a água da chuva é naturalmente ácida, possuindo o pH em torno de 5,6, caso a região possua pouca ação antrópica o pH corresponde a 5,0. Souza *et al.* (2011) explicam que a variação do parâmetro pH é decorrente do contato da água com a matéria orgânica e a dissolução desses materiais promove reações químicas que são as responsáveis pelas variações.

Os parâmetros de cor, turbidez e gosto são responsáveis pela repulsão da água pelos consumidores e a fonte pluvial costuma possuir uma qualidade superior às coletadas em outras fontes de abastecimento (CARDOSO; SILVA; PÁDUA, 2005; GOULD, 1999). Dessa forma, a água de chuva pode ser considerada como uma importante alternativa para complementar o sistema de abastecimento convencional de água tanto de regiões rurais como urbanas, sendo necessário apenas um sistema de captação de água simplificado. Contribuindo na redução da pressão dos recursos hídricos e aumento da resiliência do sistema, agregando benefícios no sistema de abastecimento convencional (NASERISAFVI; YAGHOUBI; SHARMA, 2022).

A água da chuva captada do telhado pode ser contaminada podendo possuir risco à saúde pública caso seja consumida sem o devido tratamento (ALVES *et al.*, 2014). A superfície de captação pode acumular sujeiras durante períodos de estiagem como dejetos de animais, folhas e particulados, além disso, a composição do material das superfícies influenciam na qualidade da água no percurso de captação (PALHARES, 2016). De acordo com Cobbina *et al.* (2005), a concentração de turbidez e a contaminação bacteriana associados a qualidade da água de chuva armazenada nas cisternas podem estar relacionados às partículas suspensas encontradas na atmosfera, além da forma de manuseio dessa água e os microrganismos transmitidos pelo ar e o material fecal presente na área de captação.

Andrade Neto (2013) aborda a relação direta entre a segurança sanitária das cisternas com a educação sanitária e participação social da população beneficiada em conjunto com a necessidade da proteção sanitária adequada e o monitoramento contínuo da qualidade da água armazenada, dessa forma a estratégia corretiva imediata seria o tratamento do reservatório, evitando assim a contaminação da população.

A China, por exemplo, possui mais de cinco milhões de cisternas e na região sul da Austrália, aproximadamente 80% da população rural e 30% da urbana utilizam água da chuva como fonte de abastecimento. Outros países, como Japão e Alemanha, estão expandindo a utilização dessa nova fonte de abastecimento

(ANDRADE NETO, 2013). No Brasil, a utilização de cisternas tornou-se rara após a implantação de sistemas convencionais de abastecimento de água, porém em 2002 a Articulação para o Semiárido (ASA) fundou o “Programa de Formação e Mobilização Social para Convivência com o Semiárido: Um Milhão de Cisternas Rurais (P1MC)” a Figura 1 retrata as cisternas antes e depois do programa.

A Articulação Semiárido Brasileiro (ASA) e o Ministério do Meio Ambiente (MMA) financiaram a construção de cisternas em 2001, tornando possível a construção de 500 cisternas e, posteriormente, a Agência Nacional de Águas (ANA) financiou o equivalente a 12.400 cisternas, dessa forma foram contabilizados que mais de 300 mil cisternas foram construídas, beneficiando cerca de 1,5 milhões de pessoas (ANDRADE NETO, 2013).

Figura 1 - Modelo de cisterna rural antes (A) e depois (B) do P1MC



Fonte: Andrade Neto (2013).

A água da chuva pode ser utilizada de diferentes possibilidades, porém para cada tipo de uso é necessário um tratamento para evitar uma possível contaminação. Por isso, *Raindrops* (2002), apresenta as possibilidades e precauções necessárias para cada finalidade, conforme o Quadro 1.

Quadro 1 - Usos da água e tratamentos necessários

Uso da água da chuva	Tratamento da água
Irrigação de jardins	Não é necessário tratamento
Irrigadores, combate a incêndio, condicionadores de ar	Faz-se necessário cuidados para manter os equipamentos em boas condições
Sistemas de caráter estético, exemplo, fontes, espelhos de água, lavagem de roupa, dentre outros	Tratamento higiênico, devido o possível contato da água com as pessoas

Banho, piscina, consumo humano e preparo de alimentos	Desinfecção
Fonte: <i>Rainsdrops</i> (2002).	

Vale salientar que para a utilização de águas pluviais para fins potáveis, são necessários tratamentos para que atenda os padrões presentes no Anexo XX atualizado pela Portaria Nº 888 da Portaria de Consolidação Nº 5 do Ministério da Saúde, que informa as diretrizes relacionadas ao controle da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade (BRASIL, 2021).

3.4 SISTEMA DE CAPTAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE ÁGUA DA CHUVA

A implantação de um sistema de água pluvial deve ser acompanhada de estudos para garantia da segurança operacional durante todo o seu ciclo de vida. O local empregado demanda uma necessidade de consumo contínuo e levando em consideração o clima do local, pode-se possuir estações de estiagem e que devem ser observadas logo no dimensionamento do sistema. Essa intermitência pode influenciar na segurança do abastecimento de água e necessita de uma análise crítica para proporcionar uma reserva suficiente para transpor estas fases sem a interrupção do fornecimento.

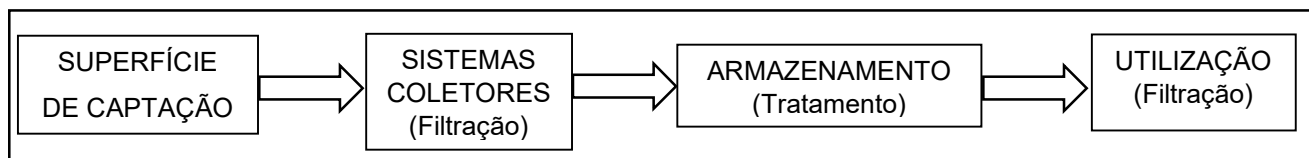
A Austrália apresenta um dos mais altos índices de utilização de água da chuva, atribuídos às restrições de acesso à água e aos descontos oferecidos pelas autoridades. Além de promover o uso em residências unifamiliares, o governo local também opera sistemas de água da chuva para a irrigação de jardins e parques esportivos (CAMPISANO *et al.*, 2017). A Alemanha é outro país que se destaca pelo uso da água da chuva. O amplo uso desse recurso é impulsionado por doações e subsídios governamentais, o que resulta em quase um terço dos novos edifícios construídos possuindo sistemas de captação e utilização de água pluvial (SCHUETZE, 2013).

O sistema de captação pluvial pode ser simples ou pode necessitar de complexas instalações requerendo diversos tipos de dispositivos. Os sistemas simples necessitam principalmente de três recursos, precipitação, condutos horizontais e verticais e o reservatório de armazenamento. Diferente dos complexos, mais comumente encontrados em empreendimentos de grande porte, por requerer

assistência profissional, investimento e reservatórios maiores ou interligados para comportar uma grande volumetria de água (WATERFALL, 2002).

De maneira simplificada o sistema de aproveitamento de água de chuva pode ser dividido em quatro processos primários e três etapas de tratamento, além da desinfecção conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Diagrama de um sistema de aproveitamento de água da chuva



Fonte: Adaptado de DTU (2009).

Independentemente do tipo de sistema a ser adotado, as condições ambientais locais, climatológicas, fatores econômicos e espaciais devem ser analisados, com a finalidade de viabilizar a implantação do sistema. Cilento (2009) afirma que a superfície de captação de água pluvial e o reservatório de armazenamento da água são estruturas principais que compõem o sistema de captação. Diferente de Tomaz (2003) que considera como fatores mais importantes para o funcionamento pleno do sistema, a precipitação do local, área de captação e a demanda hídrica do empreendimento.

A interligação dessas estruturas ocorre através de condutos horizontais (calhas) e verticais (canos), grades, filtros e caixa de armazenamento das primeiras águas da chuva, quando utilizado. O sistema poderá funcionar por gravidade ou através da inserção de bombas para a condução da água para outros reservatórios e dependendo da dimensão do sistema, a configuração do sistema pode adicionar uma rede de distribuição.

De acordo com Leal (2000), os sistemas de coleta e utilização de águas pluviais os telhados são os mais utilizados como áreas impermeáveis para a coleta da água da chuva. Após a primeira etapa a água é filtrada e então direcionada para reservatórios de acumulação que podem ser diferenciados de acordo com os seus materiais, plástico, poliéster, concreto armado, alvenaria de tijolos, aço, blocos de concreto e outros).

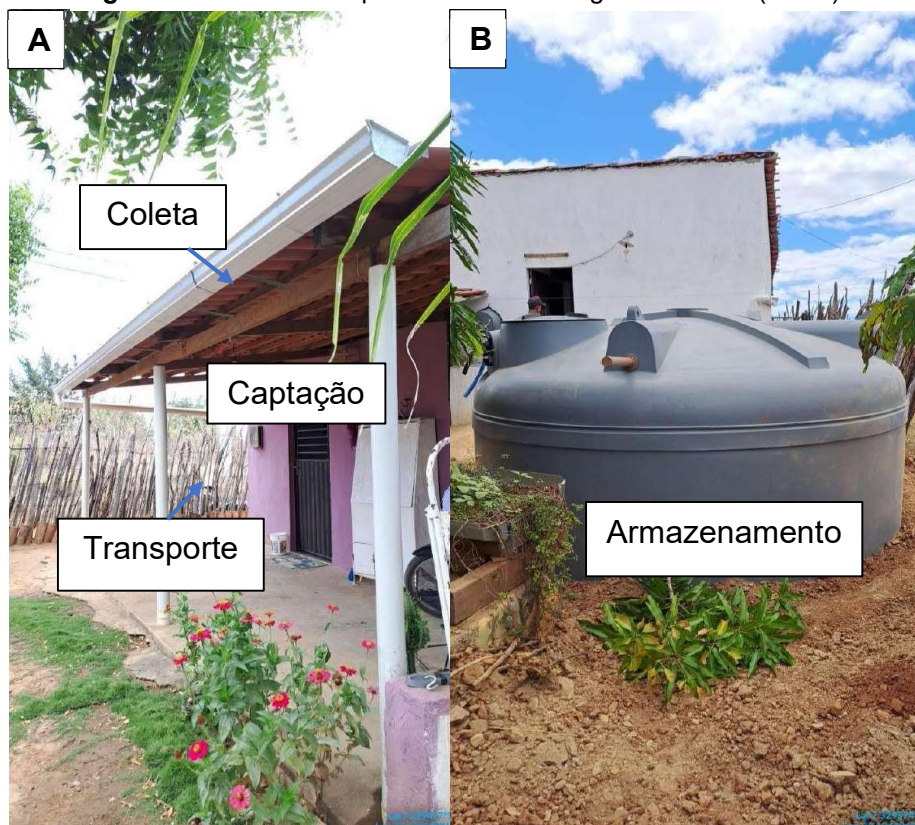
O Manual de Conservação e Reuso da Água em Edificações descreve a metodologia para a elaboração de projeto de sistemas de captação, tratamento e

utilização de água da chuva, esse documento foi elaborado em conjunto pela ANA – Agência Nacional das Águas, FIESP – Federação das Indústrias do Estado de São Paulo e SindusCon – Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo (ANA; FIESP; SINDUSCON, 2005). Possuindo como etapas os tópicos descritos abaixo.

- Determinação da precipitação média (mm.mês^{-1});
- Determinação da área de coleta;
- Determinação do coeficiente de escoamento;
- Projeto dos sistemas complementares (grades, filtro, tubulações, dentre outros);
- Projeto do reservatório de descarte;
- Escolha do sistema de tratamento necessário;
- Projeto da cisterna;
- Caracterização da qualidade da água pluvial;
- Identificação dos usos da água (demanda e qualidade).

De acordo com Lima (2012) para o funcionamento pleno do sistema de captação da água da chuva os fatores que atuam intrinsecamente é a precipitação pluviométrica, de forma que quanto mais regular e melhor distribuídas forem as precipitações ao longo do ano, em uma determinada região, melhor e mais eficiente será o dimensionamento das unidades do sistema. Além disso, visando a melhoria da qualidade da água para o consumo humano, são utilizadas técnicas de captação e tratamento da água de chuva como, radiação ultravioleta para a desinfecção, remoção de contaminantes por membrana associada à ozonização e filtros autolimpantes (ANDRADE NETO, 2004).

As formas mais comuns de captação da água da chuva são os telhados e os solos, sendo o primeiro a unidade que oferece maior simplicidade e melhor qualidade de água, de acordo com o volume captado pela superfície de captação é possível verificar o que pode ser armazenado mensalmente, através da precipitação do local. Dessa forma, a Figura 3 apresenta os componentes do sistema de aproveitamento das águas da chuva.

Figura 3 - Sistema de aproveitamento de água de chuva (A e B)

Fonte: autora.

O Quadro 2 apresenta os componentes do sistema de aproveitamento de água da chuva e as respectivas definições para cada unidade do sistema.

Quadro 2 - Unidades dos sistemas de aproveitamento de água de chuva

Unidade do Sistema Pluvial	Definição
Captação	Superfície que a chuva entra em contato diretamente, ocasionando o escoamento do líquido
Transporte	Constituído pelos componentes que encaminham a água do telhado para o reservatório de armazenamento
Filtração	Envolve os dispositivos que removem detritos e poeiras da água de chuva captada antes de ser encaminhada para o local de armazenamento
Armazenamento	Um ou mais reservatórios que podem ser denominados de cisternas
Tratamento	Desinfecção e remoção de sólidos
Distribuição	Sistema de transporte da água de chuva para uso final através de bombeamento ou gravidade

Fonte: TWDB (2005).

3.4.1 Superfície de Captação

O sistema de captação de água da chuva necessita de um planejamento que envolve a relação existente entre a área de captação e o volume para armazenamento, através dessa relação é possível reservar um suprimento viável possibilitando ao usuário uma opção mais próxima do real. A viabilidade de implantação de um sistema de captação e aproveitamento pluvial depende do índice pluviométrico local, da área de captação e da demanda de água. Contudo, os fatores ambientais locais, clima, fatores econômicos e usos da água, também são condições que devem ser considerados para a elaboração de um projeto eficiente.

O potencial de captação pode ser obtida de acordo com a NBR 10844:1989, conforme a Equação 1, que aborda a vazão encontrada a partir do método racional (ABNT, 1989).

$$Q = \frac{C.I.A}{1000} \quad (1)$$

Onde:

Q : vazão do projeto (m^3)

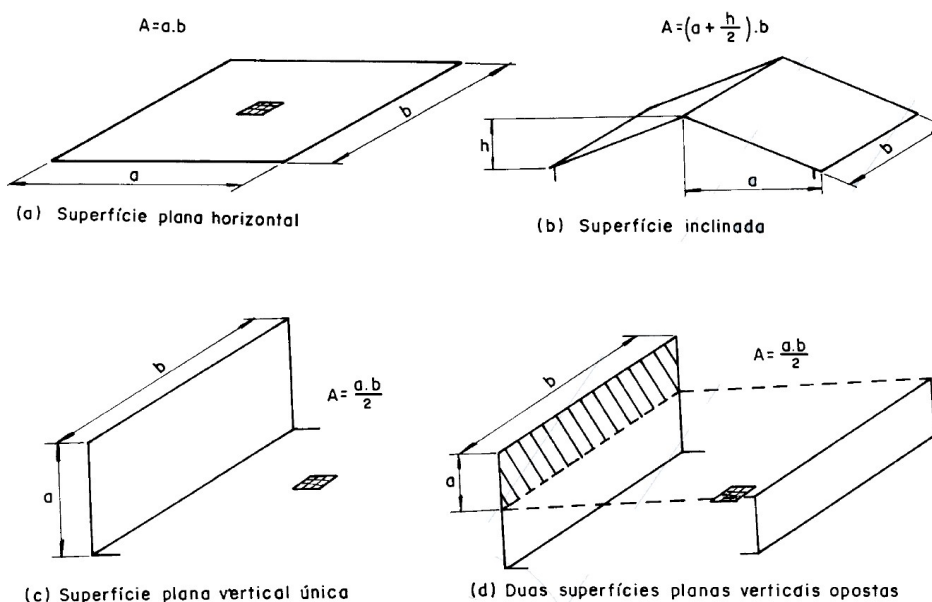
I : intensidade pluviométrica ($mm.dia^{-1}$)

A : área de contribuição (m^2)

C : coeficiente de escoamento

Para a obtenção da vazão de projeto é necessário identificar a área de contribuição da seção molhada da cobertura da edificação que depende do decaimento do telhado, conforme a Figura 4.

Figura 4 - Cálculo da área de contribuição para captação da água pluvial



Fonte: ABNT (1989)

Existem duas formas de captação, dependentes da quantidade de água que se desejam drenar, pode ser o próprio solo (macrodrenagem) ou a área do telhado em sistemas particulares. Na macrodrenagem acontece a retenção de um volume elevado de água quando o fluxo se apresenta bastante intenso. Ele apresenta três desvantagens consideráveis, exige prévio tratamento da água, elevados investimentos financeiros na sua implantação e necessita de grande área. O lago do Parque Barigui, a exemplo desse sistema envolve grandes bacias de retenção, derrama a água no rio Barigui, em Curitiba, sendo o mesmo um grande acumulador de água (CARLON, 2005).

Já a captação de água que escoar dos telhados promove uma menor contaminação da água quando se compara com a superfície do solo, pois essa possui influência direta do tráfego de pessoas e veículos. Além de possuir como vantagem a redução dos custos devido à diferença de cotas que geralmente ocorre entre o telhado e o reservatório por utilizar a gravidade (HAGEMANN, 2009). Os materiais geralmente encontrados nos telhados são, metal, cerâmica, concreto, mosaico, madeira, ardósia, entre outros (TWDB, 2005).

De acordo com Lima (2012), é importante conhecer o material em que o telhado é constituído para a definição do coeficiente de escoamento e para evitar

contaminações na água da chuva devido à ocorrência de componentes tóxicos na composição, que podem ser solubilizados e/ou lixiviados no decorrer da precipitação. O potencial de captação de água da chuva necessita ser verificado para a avaliação da potencialidade de instalação.

3.4.2 Transporte

As calhas e tubos permitem coletar a água da chuva decorrente da superfície de captação e direcionar para o reservatório de armazenamento. Os materiais mais utilizados para a concepção dessas unidades são o PVC, alumínio e aço galvanizado, sendo os dois últimos materiais os mais recomendados devido à resistência a corrosão, esses materiais devem possuir como características a longa durabilidade, pouca sensibilidade às mudanças de temperatura, baixa rugosidade, leveza e rigidez (LIMA, 2012).

A limpeza regular desses dispositivos deve ser realizada semestralmente, como recomendado pela NBR 15527:2019 (Água de chuva – aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para não fins potáveis – requisitos), para evitar a contaminação da água coletada. As unidades de transporte devem ser periodicamente inspecionadas e limpas, o período chuvoso permite uma visualização mais fácil dos problemas (ABNT, 2019).

3.4.3 Armazenamento

O sistema de reservação é um elemento essencial de captação pluvial essencial, para o seu dimensionamento são necessários alguns critérios importantes como, custos totais de implantação, demanda de água, áreas de captação, regime pluviométrico e confiabilidade requerida para o sistema. Vale salientar que a distribuição temporal anual das chuvas é uma variável importante no dimensionamento do reservatório. Com base no volume obtido no cálculo e das condições do local, o armazenamento da água da chuva poderá ser realizado para atender a demanda em períodos curtos, médios ou longos de estiagem (CARLON, 2005).

Geralmente, concreto, madeira, fibra de vidro, aço inoxidável e polietileno são os materiais utilizados na construção dos reservatórios, contudo, a seleção desse material depende, principalmente, da finalidade do uso da água, devido ao fato desses materiais se diferenciarem com relação à durabilidade, segurança e custo. Além disso, para facilitar o transporte da água com a diminuição das distâncias, os reservatórios devem ser construídos o mais próximo possível do ponto de utilização. O Quadro 3 apresenta as vantagens e desvantagens na utilização de tanques enterrados ou semienterrados e superficiais no aproveitamento de água da chuva.

Quadro 3 - Vantagens e desvantagens de tanques superficiais e enterrados/semienterrados

Tipos	Vantagens	Desvantagens
Tanques superficiais	Simplifica a verificação de vazamentos	Demanda espaço
	A remoção da água pode ser realizada por gravidade	Custo elevado
	Pode ser elevada para aumentar a pressão da água	Está sujeita ao ataque de intempéries
Tanques enterrados / semienterrados	Demanda pouco espaço	Necessita de bombas e encanamentos
	A temperatura da água é mais baixa	Difícil detecção de vazamentos
	Maior aceitação do usuário	Possibilidade de contaminação pelo solo ou inundações
	Custos reduzidos por permitir paredes mais finas	Dificuldade de esvaziamento para limpeza

Fonte: Adaptado Lima (2012).

As cisternas devem apresentar cuidados com relação ao armazenamento de água, visando a garantia da qualidade da água e a manutenção dos reservatórios, por isso, recomenda-se que a entrada da luz deve ser impedida para evitar a proliferação de algas, a cobertura das cisternas deve ser impermeável e a entrada de animais e insetos deve ser evitada instalando-se telas nas tubulações de entrada e saída e a disponibilização de manutenção do sistema como inspeção e limpeza (LIMA, 2012). De acordo com *The Texas Manual on Rainwater Harvesting* (2005), é importante que os tanques de reservação sejam protegidos da radiação solar.

De acordo com a NBR 5626:2020 que trata da instalação predial de água fria, o reservatório para armazenamento da água deve possuir material resistente à corrosão ou ser provido internamente de revestimento anticorrosivo (ABNT, 2020). Diversos métodos de dimensionamento de reservatório de água de chuva são encontrados na literatura, em trabalhos técnicos e na norma NBR 15527 (ABNT, 2019). Esta norma prevê alguns métodos como, Rippl, empírico brasileiro ou método de Azevedo Neto, empírico alemão, empírico inglês, prático australiano e simulações. Foram abordados nesse estudo os métodos Rippl, empírico brasileiro ou método de Azevedo Neto, empírico inglês e prático australiano.

a. Método de Rippl

Tomaz (2003) aborda que esse método apresenta o volume extremo do reservatório, salienta-se a importância na sua obtenção como uma referência máxima, comparando com os demais volumes encontrados pela aplicação dos outros métodos. Essa metodologia se baseia nas séries históricas das precipitações diárias ou mensais, na área de captação e na demanda hídrica. O somatório da demanda e do volume de chuva em um mesmo período indicará o excesso ou a falta de água disponível no reservatório. Através dos volumes acumulados, verifica-se o volume máximo atingido que deverá ser considerado para o dimensionamento do reservatório, segundo as Equações 2, 3 e 4.

$$Q_{(t)} = \frac{P_{(t)} \cdot A \cdot C}{1000} \quad (2)$$

Onde:

$Q_{(t)}$: volume de água da chuva captada no tempo t (m^3);

$P_{(t)}$: precipitação no tempo t - mensal (mm);

A : área de captação (m^2);

C : coeficiente de escoamento superficial (adimensional).

$$S_{(t)} = D_{(t)} - Q_{(t)} \quad (3)$$

Onde:

$S_{(t)}$: volume de água no reservatório no tempo t (m^3);

$D_{(t)}$: demanda ou consumo no tempo t (m^3);

$Q_{(t)}$: volume de chuva captada no tempo t (m^3).

$$V = \sum S_{(t)} \quad , \text{ somente para valores } S_{(t)} > 0 \quad (4)$$

b. Método Prático Brasileiro ou Método Azevedo Neto

O método consiste em uma metodologia prática com a manipulação da média anual de precipitação e o somatório de meses com incidência de baixa precipitação, conforme a Equação 5.

Foram considerados como meses com baixa ocorrência pluviométrica os meses que possuíam precipitação abaixo da média mensal.

$$V = 0,042 . P . A . T \quad (5)$$

Onde:

V: volume do reservatório (m^3)

P: precipitação média anual (mm)

A: área de captação (m^2)

T: n° de meses abaixo da média

c. Método Prático Inglês

Consiste em um método simplificado que se baseia no volume ideal para o reservatório de 5% da precipitação média anual captada, desprezando a demanda necessária. O volume do reservatório que se utiliza segundo esse método é o maior valor resultante e pode ser calculado de acordo com a Equação 6.

$$V = 0,05 . P . A \quad (6)$$

Onde:

V: volume do reservatório (m^3);

A: área de captação (m^2);

P: precipitação média anual (mm).

d. Método Prático Australiano

Para a aplicação deste método são utilizados os dados médios de precipitação mensal, área de captação e demanda necessária, de acordo com a Equação 7.

$$Q = A.C.(P - I) \quad (7)$$

Onde:

Q: Volume mensal de chuva captada (m³);

A: área de captação (m²);

C: coeficiente de escoamento superficial (adimensional);

P: precipitação média mensal (mm);

I: perdas (primeira chuva, evaporação, dentre outras) (mm).

O cálculo do reservatório é realizado por tentativas, com o objetivo de utilizar valores otimizados de confiança e volume, de acordo com a NBR 15527 (ABNT, 2019), conforme as Equações 8, 9 e 10.

$$V_{(t)} = V_{(t-1)} + Q_{(t)} - D_{(t)} \quad (8)$$

Onde:

$V_{(t)}$: volume de água que está no reservatório no final do mês t (m³);

$V_{(t-1)}$: volume de água que está no tanque no início do mês (m³);

$Q_{(t)}$: volume mensal produzido pela chuva no mês t;

$D_{(t)}$: demanda mensal (m³).

Considerar o primeiro mês com reservatório vazio.

$$\text{Quando } (V_{(t-1)} + Q_{(t)} - D_{(t)}) < 0, \text{ o } V_{(t)} = 0 \quad (9)$$

Após isso, calcula-se a confiança com a finalidade de verificar a eficácia do reservatório (Equação 11)

$$P_r = \frac{N}{Nr} \quad (10)$$

Onde:

P_r : falha;

Nr: n° total de meses em que o reservatório não atendeu a demanda ($V_{(t)}=0$);

N: n° de meses considerados.

$$\text{Confiança} = 1 - P_r \quad (11)$$

Os valores de confiança recomendados devem estar entre 90% e 99%.

3.4.4 Viabilidade Econômica

Marinoski (2007) propôs uma metodologia para verificar a viabilidade econômica e, seguindo a mesma, foi avaliada a diferença entre o custo médio mensal de água proveniente do sistema de abastecimento de água convencional (antes da instalação do sistema) e o custo médio mensal de água (após a instalação do sistema de captação de água de chuva) adicionando o custo com a energia elétrica necessária para o funcionamento do mesmo, seguindo a Equação 12.

$$E = C_{Ab} - (C_B + C_{EE}) \quad (12)$$

Onde:

E: Economia média mensal após a instalação do sistema de aproveitamento de água da chuva (R\$.mês⁻¹);

C_{Ab} : Custo médio mensal de água para o abastecimento (antes da instalação do sistema) (R\$.mês⁻¹);

C_B : Custo médio mensal de água potável para o suprimento da demanda (após instalação do sistema) (R\$.mês⁻¹);

C_{EE} : custo médio mensal de energia elétrica para bombeamento da água no sistema (R\$.mês⁻¹).

3.5 FATORES QUE CONTRIBUEM NA FALTA DE ACEITAÇÃO DE SISTEMAS DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA DE CHUVA

Em estudos realizados na cidade de Bangladesh por Bashar, Karim e Imteaz (2018), os pesquisadores concluíram que grande parte da população desconhece o potencial e a qualidade da água de chuva, identificaram que as pessoas se sentem

inseguras ao utilizar água de chuva para abastecimento humano, uma vez que supõem que a mesma é de baixa qualidade, podendo causar problemas de saúde e o seu uso não oferecer impacto financeiro no orçamento doméstico.

Por outro lado, observaram que o uso da água de chuva em seis edifícios residenciais com 50 habitantes cada e uma área de cobertura de 200 m², economizou de 500-800 m³ de água por ano a partir da implantação do sistema de captação pluvial de forma suplementar ao sistema de abastecimento de água da cidade. O período de retorno de investimento observado foi de 2-6 anos com uma confiabilidade máxima de 30-40% (BASHAR; KARIM; IMTEAZ, 2018).

Alguns dos principais fatores que influenciam a aceitação e disseminação dos sistemas de coleta de chuva são econômicos, falta de conhecimento técnico sobre os sistemas e uma melhor percepção da real disponibilidade de água em áreas atendidas por sistemas de abastecimento convencionais (SILVA *et al.*, 2022).

3.6 PROTEÇÃO SANITÁRIA DE SISTEMAS DE CAPTAÇÃO PLUVIAL

Estudos defendem que em ambientes rurais o nível de contaminação atmosférica na água da chuva é baixo, porém devido o contato da água com a superfície de captação, seja telhado ou solo, e durante o armazenamento e a distribuição essa qualidade decai. As formas de contaminação mais comuns são fezes de animais, poeira, folhas de árvores, parte do revestimento do telhado, tintas, dentre outros, esses materiais carregados podem ocasionar contaminações por bactérias e parasitas gastrointestinais (LIMA, 2012). Por isso, Tomaz (2003) afirma que a qualidade da água da chuva armazenada nos reservatórios deve considerar uma série de etapas como, antes da água atingir o telhado, após escorrer pelo telhado, no interior do reservatório e no ponto de uso.

Os períodos de estiagem, sejam eles longos ou curtos, promovem um acúmulo de impurezas na superfície de captação, por isso, visando a eliminação desses materiais e necessário desviar as primeiras águas da chuva. Possuindo duas formas de eliminação de maneira manual ou com a utilização de aparelhos automáticos.

O Manual de Saneamento divulgado pela Fundação Nacional de Saúde (FUNASA, 2006), recomenda o descarte dessas primeiras águas para evitar que as impurezas sejam carregadas para o reservatório de armazenamento. É comumente realizado o desvio das primeiras águas manualmente, pouco depois do início da

precipitação, desconectando os tubos condutores das calhas e os reconectando. Contudo, a forma mais segura e eficiente para garantir a proteção sanitária precedendo o armazenamento é utilizando os dispositivos de desvio automático e descarte das primeiras águas de cada chuva (ANDRADE NETO, 2003).

Xavier (2006) afirma que a coleta de água das cisternas e o transporte até o ponto de consumo, normalmente é realizado com a utilização de baldes ou latas, e por vezes esses materiais são manuseados de maneira inadequada, ocasionando na contaminação da água reservada. O autor alerta que a coleta dessa água é um ponto importante para a preservação da água armazenada. E, podem ser utilizadas tecnologias de baixo custo visando a redução dos casos de doença de veiculação hídrica para as famílias que utilizam cisternas para o armazenamento de água, sendo algumas ações e/ou recomendações (KATO, 2006):

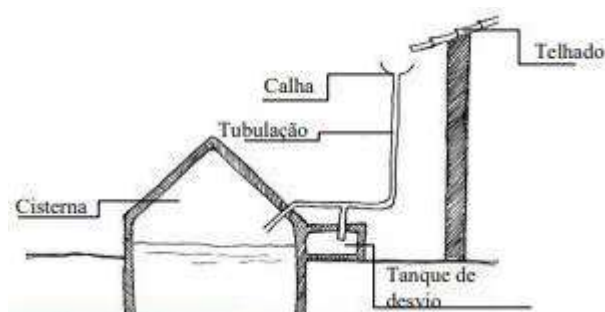
- Dispositivo para o desvio das primeiras águas da chuva;
- Filtros de areia para a retenção de impurezas e microrganismos de maior tamanho;
- Não possuir contato direto com a água da cisterna;
- Tela de náilon ou arame para impossibilitar a entrada de animais.

Carvalho *et al.* (2018) avaliaram um dispositivo de desvio e armazenamento automático das primeiras águas da chuva em cisternas, sendo avaliados o desvio de 1, 2, 3 e 4 mm de chuva, de acordo com a qualidade da água analisado na amostragem de cada milímetro foi percebido que o volume com a maior concentração de poluentes é o primeiro milímetro. O mesmo apresentou uma redução de coliformes totais em 98% e *E. coli* em 100%. Comprovando que o desvio do primeiro milímetro deve ser descartado ou utilizado para fins de características menos nobres como, lavagem de pisos, reposição no volume de fontes, irrigação de jardins, dentre outros.

Andrade Neto (2003) desenvolveu um dispositivo automático das primeiras águas de chuva, mostrado na Figura 5, o mecanismo utiliza um tê intercalado na tubulação de entrada do reservatório e possibilita a lavagem da superfície de captação para um pequeno tanque de armazenamento anterior ao tanque de reservação. Devido o tanque ser fechado quando o pequeno reservatório é cheio promove a entrada da água de melhor qualidade na cisterna, o fecho hídrico do dispositivo não apresenta boias ou outros mecanismos. O autor salienta a necessidade de

esvaziamento pela tubulação de descarga para que quando ocorra novas precipitações o dispositivo esteja pronto para um novo volume de chuva.

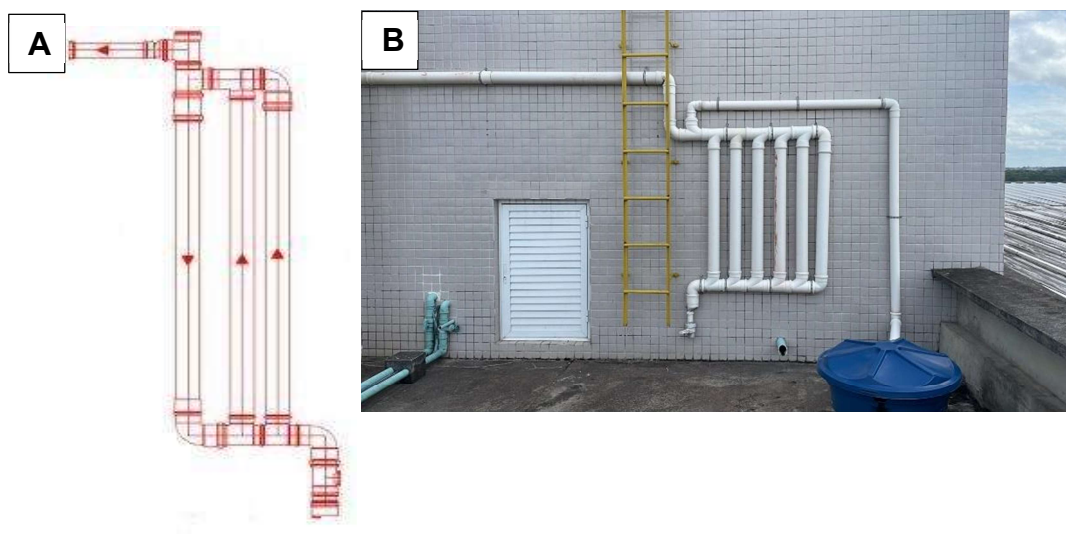
Figura 5 - Dispositivo automático de desvio das primeiras águas da chuva



Fonte: Andrade Neto (2003)

Lima (2012) desenvolveu um dispositivo composto por tubos e conexões de PVC para esgoto, Figura 6, que utiliza os princípios físicos dos vasos comunicantes e do fecho hídrico. O processo ocorre a partir do momento em que à medida que o telhado é lavado, a água é acumulada nos tubos verticais e após os mesmos estarem no seu volume total a água se direciona para a cisterna. E, da mesma maneira que o autor anteriormente citado recomenda, o autor do então chamado DesviUFPE, afirma que é necessário o esvaziamento do sistema, permitindo o funcionamento pleno do sistema no próximo evento chuvoso.

Figura 6 - Esquema do dispositivo de desvio (A) e desvio instalado em prédio de zona urbana (B)



Fonte: Adaptado de Lima (2012).

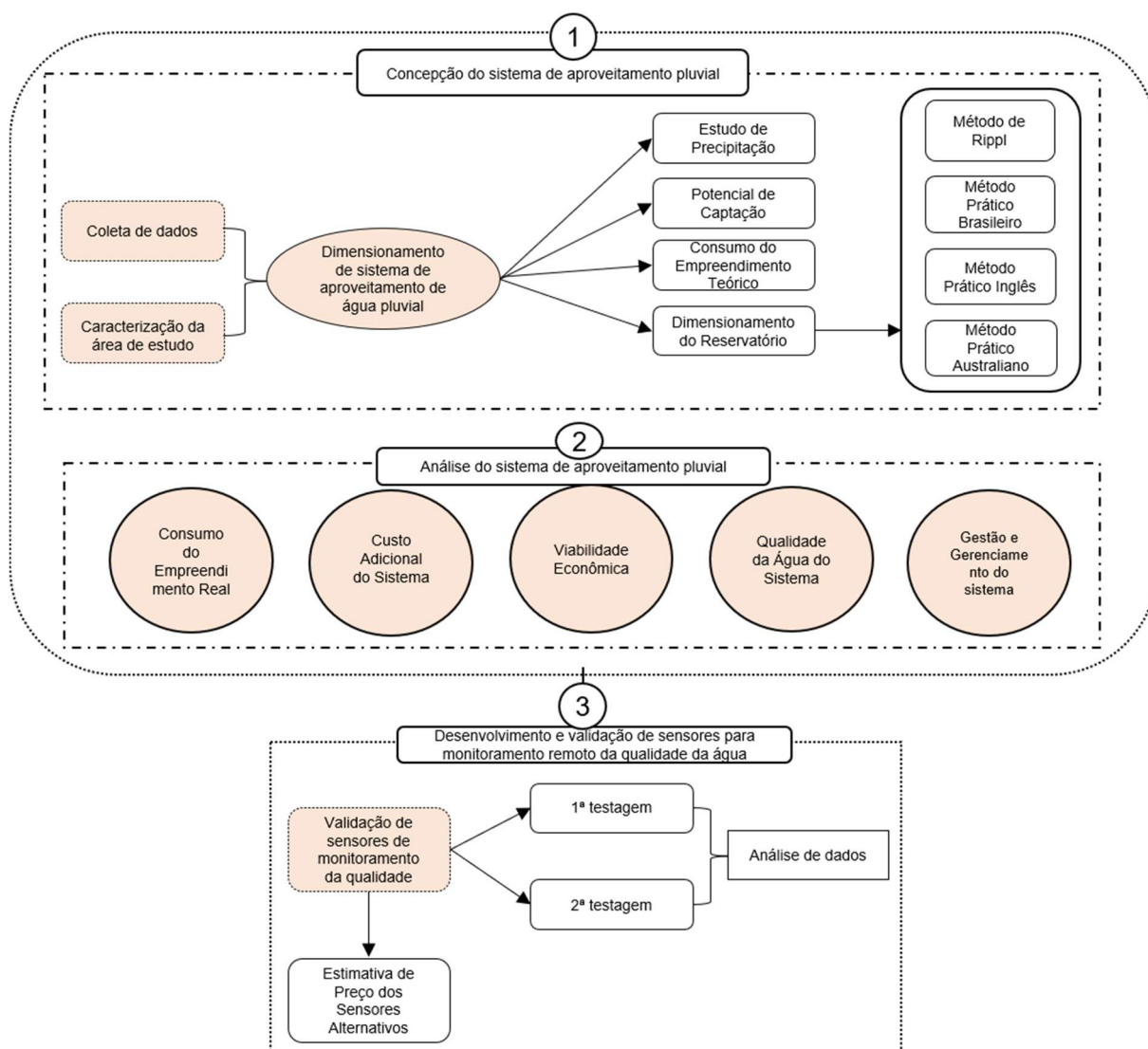
A limpeza e esvaziamento do sistema pode ser realizada por descarga hidráulica, permitida devido a geometria do dispositivo. Além disso o material desse dispositivo garante estanqueidade, facilidade de montagem, que possibilita realizar uma fácil manutenção, o sistema é ajustável e de fácil desmontagem e transporte (LIMA, 2012).

Os dois sistemas relatados acima, possuem um forte apelo para os usuários de zonas rurais, demonstrando uma necessidade de desenvolvimento de um dispositivo voltado para os ambientes urbanos, uma vez que as demandas dessas zonas demandam uma renovação para uma maior aceitabilidade da população.

4 METODOLOGIA

Na Figura 7 estão apresentadas as etapas envolvidas no desenvolvimento do presente trabalho: 1. concepção do sistema de aproveitamento pluvial, seguida de 2. análise do sistema de aproveitamento pluvial e 3. desenvolvimento e validação de sensores para monitoramento remoto da qualidade da água.

Figura 7 - Fluxograma das etapas para a execução do trabalho



Fonte: autora.

4.1 ETAPA 1. CONCEPÇÃO DO SISTEMA DE APROVEITAMENTO PLUVIAL

A etapa 1 envolveu a coleta de dados e caracterização da área de estudo para o dimensionamento do sistema de aproveitamento de água pluvial que necessita de um estudo de precipitação, potencial de captação, consumo do empreendimento teórico e dimensionamento do reservatório com os métodos aplicados.

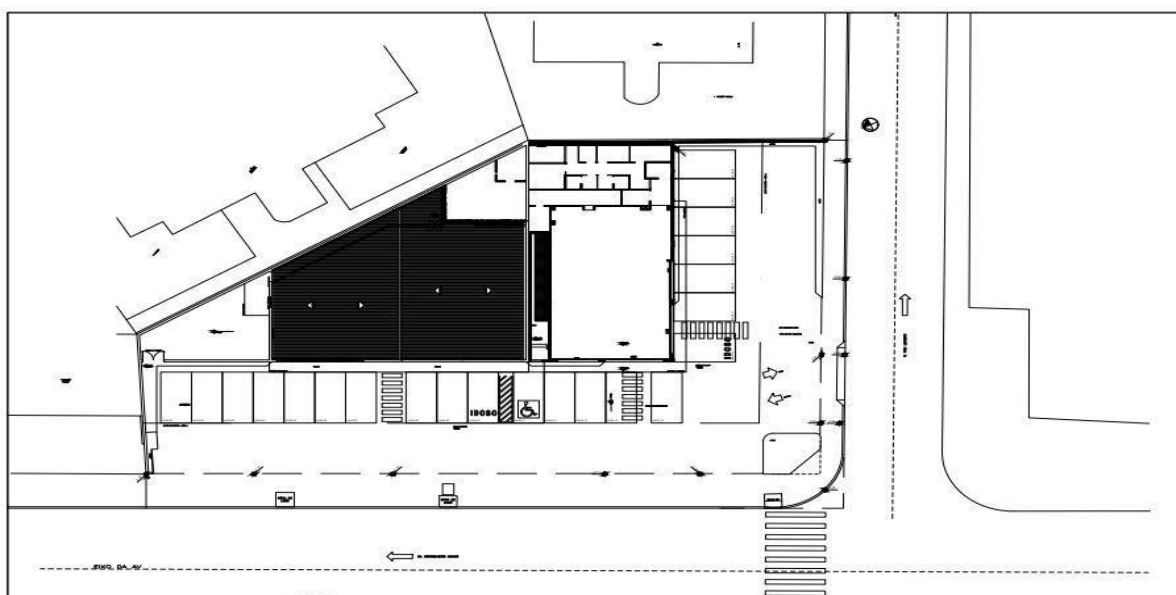
4.1.1 Coleta de Dados para a Concepção do Sistema de Aproveitamento Pluvial e Análise de Aproveitamento Pluvial

O empreendimento objeto de estudo desta dissertação foi uma empresa do ramo de alimentos localizada na cidade de Recife, que preza pela sustentabilidade ambiental.

Os dados necessários para a concepção do sistema de aproveitamento pluvial (área de contribuição, material do telhado, número de funcionários, quantitativo de refeições diárias) e análise de aproveitamento pluvial (consumos mensais de água, coleta de água realizadas no local) foram disponibilizados pela gestão do empreendimento. O empreendimento optou pela utilização de água de chuva a partir da etapa de construção do projeto, possibilitando apenas o dimensionamento do reservatório sendo utilizada a superfície de captação, as calhas e os condutores horizontais e verticais já previstos no projeto. Além disso, após a implantação efetiva do sistema foi possível monitorar a qualidade da água e gerenciar o funcionamento do sistema.

4.1.2 Caracterização da Área de Estudo

O empreendimento foi inaugurado em agosto de 2022. O local possui 379,97 m² de área total do empreendimento, com área de captação de 301 m² (Figura 8).

Figura 8 - Demonstrativo do empreendimento

Fonte: autora.

A empresa possui cerca de 50 funcionários que atuam na limpeza, cozinha, atendimento ao público, administrativo e segurança. O local oferece em média 150 refeições por dia.

4.1.3 Dimensionamento de Sistema de Aproveitamento de Água Pluvial

4.1.3.1 Estudo de Precipitação

Foi realizado um levantamento e análise de dados pluviométricos da estação pluviométrica localizada no município de Recife. O histórico dos dados de precipitação foi obtido no site da Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC) (<http://old.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php#>). Para esse estudo foi utilizado um banco de dados dos anos de 2011-2020 de precipitação e calculado o total acumulado de chuva mensal.

Com base nos dados coletados, foi obtida a média aritmética das precipitações mensais. Essas informações permitem uma análise da potencialidade de oferta de água de chuva na região, encontrando os meses com maiores e menores ocorrências de chuva e os períodos sem precipitação. Foi utilizado a média pluviométrica mensal do histórico para os cálculos de dimensionamento.

4.1.3.2 Potencial de Captação

O potencial de captação foi obtido conforme previsto na equação 1 sendo obtido a vazão de água que as superfícies do telhado do empreendimento captam e direcionam para as calhas e condutos horizontais e verticais.

A intensidade pluviométrica (I) foi obtida a partir da média de precipitação mensal do histórico. A Tabela 1 demonstra a variação do coeficiente de Runoff de acordo com o material do telhado. O empreendimento possui telha térmica de aço, por isso, foi adotado a média do coeficiente de Runoff 0,85.

Tabela 1 - Coeficientes de Runoff médios

Material	Coeficiente de Runoff
Telhas cerâmicas	0,80 a 0,90
Telhas esmaltadas	0,90 a 0,95
Telhas corrugadas de metal	0,80 a 0,90
Cimento amianto	0,80 a 0,90
Plástico, PVC	0,9 a 0,95

Fonte: Tomaz (2003)

O conhecimento da área de contribuição da seção molhada da cobertura da edificação é necessário para a obtenção da vazão de projeto, e depende do decaimento do telhado. A figura 4 apresenta os tipos de telhados e foi identificado que o empreendimento apresenta uma superfície plana horizontal.

4.1.3.3 Consumo do Empreendimento Teórico

A demanda per capita de água considerada foi de 25 L.(refeição.dia)⁻¹, conforme adotado por Creder (2006) para restaurantes. Vale salientar que o empreendimento possui 50 funcionários. A gestão do empreendimento estima cerca de 150 refeições por dia.

A partir desse levantamento, foi calculada a demanda hídrica avaliando as variações diárias e horárias. A verificação das variações diárias, considera a relação entre o maior consumo diário verificado e a vazão média anual resultando no coeficiente do dia de maior consumo (k1) que se encontra na faixa entre 1,2 e 2,0. Dessa forma, foi utilizado o valor de k1=1,2. Já com relação às variações horárias, o

coeficiente da hora de maior consumo (k_2) é a relação entre o máximo consumo horário no dia de maior consumo e o consumo médio horário do dia de maior consumo, e pode variar entre 1,5 e 3,0. O valor de K_2 adotado foi 1,5.

4.1.3.4 Dimensionamento de Reservatório

Foram aplicados e analisados neste trabalho os métodos Rippl, empírico brasileiro ou método de Azevedo Neto, empírico inglês, prático australiano (previstos no tópico 3.4.3) comparando os volumes críticos (volume máximo) com o tempo de enchimento, tempo de esvaziamento, potencial utilizado e volume ocioso. Para a aplicação dos cálculos foi utilizado o coeficiente de Runoff de 0,85, média anual de precipitação de 2066,64 mm e média mensal de 172,22 mm.

4.2 ETAPA 2. ANÁLISE DE APROVEITAMENTO PLUVIAL

4.2.1 Consumo do Empreendimento Real

Porto (2006) afirma que os sistemas de abastecimento de água possuem variações de consumo significativas, tais como, anuais, mensais, diárias, horárias e instantâneas. Em projetos de sistemas de abastecimento de água as alterações de consumo devem ser analisadas para que o cálculo de volume de consumo seja o mais próximo da realidade possível.

A análise do consumo foi realizada com a utilização da média de consumo mensal do empreendimento, analisando os meses de pleno funcionamento do empreendimento.

4.2.2 Custo Adicional do Sistema

A água que entra em contato com a superfície de captação é conduzida por calhas e condutos horizontais e verticais até as caixas de drenagem e essas são direcionadas ao desvio do 1º mm de chuva, que com a área de captação de 301 m² resulta no volume de 301 L, possuindo o direcionamento para o primeiro reservatório por meio da gravidade, após isso a instalação de uma bomba hidráulica na saída do

reservatório inferior é responsável pelo transporte para outro reservatório para uma posterior utilização.

As condições para a elaboração desse projeto constam na NBR 12214 (ABNT, 1992). Para a execução deste tipo de projeto, recomenda-se a análise das especificidades das tubulações de sucção e recalque, alturas e vazão para o conjunto motobomba. Após a seleção da potência e verificada a vazão ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$) para o funcionamento, foram estimados o tempo de funcionamento diário e o número de dias de uso no mês. A obtenção dos custos com energia elétrica devido o bombeamento utiliza os dados referentes a motobomba escolhida e os valores cobrados pela Companhia Elétrica local de acordo com o enquadramento do empreendimento.

Para a determinação do consumo de energia elétrica utilizada no processo de bombeamento, utiliza-se a Equação 13. Não foram acrescidos os impostos cobrados pela companhia de fornecimento de energia.

$$C_{EE} = P_{MB} \cdot t \cdot V_{CEEE} \quad (13)$$

Onde:

C_{EE} : custo mensal de energia elétrica para o bombeamento da água pluvial (R\$);

P_{MB} : potência da motobomba (kW);

t : tempo de funcionamento da motobomba ($\text{h}.\text{dia}^{-1}$);

V_{CEEE} : valor cobrado pela CEEE pela energia elétrica consumida ($\text{R}.\text{kWh}^{-1}$).

4.2.2.1 Cobrança CEEE pela energia elétrica

A Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE) cobra pela soma das tarifas TUSD – Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição R\$ 0,48866833 e TE – Tarifa de Energia R\$ 0,40737599. A tarifa resultou no valor de R\$ 0,89604 KWh, sem adicional de bandeiras (verde, amarela e vermelha). Portanto, para o efeito de cálculo foi utilizado esse valor fixo.

4.2.3 Viabilidade Econômica

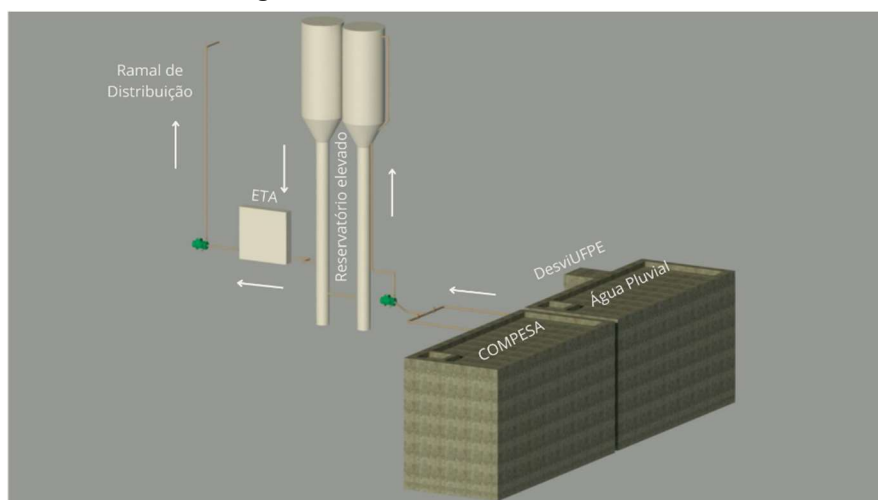
A viabilidade econômica foi obtida pela metodologia de Marinoski (2007) e avaliada comparando com o tempo de retorno, considerando o custo do sistema (tratamento, automatização e bomba pressurizadora).

4.2.4 Qualidade da Água

O monitoramento da qualidade da água armazenada teve início em outubro de 2022. A água armazenada no tanque misto é proveniente da chuva e do Sistema de Abastecimento Convencional da região. Dessa forma, em determinados momentos o estabelecimento é abastecido com água de chuva e em outros com água do sistema público ou com uma mistura de ambas as fontes. A água de chuva é complementar e passa por uma Estação de Tratamento de Água (ETA) para a potabilização desse recurso.

A ETA é composta por filtros modulares construídos em Aço Inoxidável 304, classe de pressão de $5 \text{ kgf.}(\text{cm}^2)^{-1}$. O elemento filtrante é a tecnologia responsável por filtrar as impurezas existentes e são construídos em fibra de aço inoxidável, de forma a criar uma estrutura porosa com alta permeabilidade e de elevada resistência mecânica e química. A água produzida apresenta turbidez inferior a 0,3 NTU e a desinfecção é feita por ultravioleta. O sistema de desinfecção por ultravioleta é uma unidade de tratamento consagrada para inativação de patógenos, bactérias e parasitas. O sistema possui capacidade para tratar de atender valores de afluentes com turbidez de até 150 NTU. A tecnologia é parte do sistema comercializado pela Startup Pluvi da UFPE e, por esta razão, maiores detalhes não são fornecidos.

Foram realizadas quatro coletas para análise da qualidade da água 6 coletas da amostra controle (torneira de jardim). Foram coletadas amostras do sistema de acordo com a origem de abastecimento do empreendimento: água pluvial, água pluvial com água do sistema convencional e água do sistema convencional. A Figura 9 demonstra o sistema de armazenamento e tratamento similar ao utilizado no empreendimento.

Figura 9 - Demonstrativo do sistema

Fonte: autora.

A coleta das amostras foi realizada com recipientes esterilizados de 250 ml, em autoclave a 120°C e 1 atm por 15 minutos, nos pontos de coleta foram aplicados álcool 70% para esterilização local e a torneira foi aberta por 2 min. Os frascos foram adicionados no isopor e transportados para o Laboratório de Saneamento Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco para análise. Os parâmetros avaliados estão indicados na Tabela 2 e foram analisados de acordo com o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1998). A contagem de bactérias foi realizada pelo método de membranas. Após o tempo de incubação, foi utilizado um contador manual de colônias para contagem de Unidades Formadoras de Colônias (UFC).

Tabela 2 - Parâmetros e métodos utilizados no monitoramento da qualidade da água

Parâmetro	Método
Alcalinidade total	2320 B.
Condutividade	2510 B.
Cor aparente	2120 C.
Cloretos	4500 – Cl ⁻ B.
Dureza total	2340 C.
pH	4500 – H ⁺ B.
Turbidez	2123 B.
Coliformes totais	9223 B.
<i>E. coli</i>	9223B

Fonte: autora.

4.3 ETAPA 3. DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE SENSORES DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA

A necessidade de monitoramento da qualidade da água armazenada nos reservatórios nos levou a desenvolver um trabalho colaborativo com o Laboratório de Computação Embarcada e Tecnologias Industriais (LACETI) da UFPE. O objetivo foi desenvolver sensores de qualidade com compartilhamento de informações em servidores online, para que os usuários possam ter acesso à qualidade da água em qualquer lugar e que tenham segurança na utilização de águas pluviais como fonte de abastecimento com baixo custo de investimento. O sistema foi desenvolvido pelos alunos Vitor, Túlio, Gabriel, Ryan e Marvson, do LACETI sob orientação da Profª Edna Barros. O protótipo construído em laboratório contém um módulo de sensoriamento e controle (Figura 10).

Figura 10 - Sensor Alternativo de pH, STD e temperatura



Fonte: autora.

Nesta dissertação foi feita a validação do funcionamento do sistema de acordo com cada sensor, que para o monitoramento qualitativo foi pH, Sólidos Totais Dissolvidos (STD) e temperatura que foram escolhidos por serem indicativos associados a repulsa pela água de chuva pela população.

O pH está associado a característica da água (ácida, neutra e alcalina) e consequentemente a aceitação do usuário sobre o estado da água armazenada. O sensor de STD é um parâmetro que confere cor à água, e por isso, é necessário o monitoramento como indicativo de contaminação. O sensor de turbidez apresentou problemas na calibração, não sendo utilizado nas medições. A avaliação dos custos foi utilizada para a análise de viabilidade econômica e de desenvolvimento do produto.

4.3.1 Testagem e Análise de Dados

A verificação do funcionamento do sistema foi realizada a partir da comparação dos resultados obtidos pelos sensores desenvolvidos com os gerados por sensores comerciais, de bancada, presentes no Laboratório de Biologia Molecular e Tecnologia Ambiental (LABIOTA).

A verificação do funcionamento dos sensores foi realizada de duas formas. O primeiro teste foi feito a partir da medição dos parâmetros para a mesma amostra de água pelos dois sensores desenvolvidos em laboratório e pelos sensores de alta precisão presentes no LABIOTA. A faixa de valores das amostras estiveram entre 5,49 e 9,51 para o sensor de pH. Os sensores passaram por 50 repetições de leituras com diferentes amostras com pH na faixa delimitada. O objetivo desta atividade foi analisar o comportamento dos sensores desenvolvidos pelo LACETI de forma comparativa com equipamentos com alta precisão, chamados padrão ouro.

Para validação dos sensores de STD a faixa do teor de sólidos das amostras esteve entre 0,00 a 591,86 ppm, uma vez que a Portaria Nº 888 estabelece que o valor máximo permitido para água potável sendo 500 mg.L⁻¹ para STD (BRASIL, 2021).

Para o sensor de temperatura a legislação não prevê um limite ideal para consumo humano, diante disso, não foi delimitado faixas como nos outros dois sensores. A validação deste parâmetro foi feita com a elevação da temperatura da amostra de água até 50°C e após isso a cada 2 minutos a leitura foi efetuada com a utilização dos sensores desenvolvidos e de um termômetro convencional, com 50 leituras.

Essa primeira testagem foi realizada para analisar a precisão da leitura dos sensores alternativos em comparação com os sensores padrão ouro. A verificação das leituras passou por uma análise estatística.

Após isso, foi realizada outra testagem com o intuito de confirmar o desempenho obtido anteriormente para os novos sensores desenvolvidos pela equipe do LACETI. Essa análise ocorreu a partir da leitura de 6 amostras diferentes de pH (3,97; 4,17; 6,59; 7,79; 7,81 e 9,32) e STD (0,7; 17,1; 47,6; 66,1; 480,0 e 485,0), cada uma delas sendo repetidas por 3 vezes, para cada sensor. Nesta etapa, foi testado outros 3 sensores desenvolvidos e foi realizado esse procedimento em todos eles e no padrão ouro.

Para a análise dessa última testagem, foi realizado a análise da variância (ANOVA) para o teste das duas possíveis hipóteses, H_0 (hipótese nula), que sinaliza que todas as médias analisadas do conjunto de dados são estatisticamente iguais; e a H_1 (hipótese alternativa), que demonstra que pelo menos uma das médias é diferente estatisticamente das demais. A avaliação dessas hipóteses leva em consideração um nível de significância 0,05 (JUNIOR *et al.*, 2022).

4.3.2 Estimativa de Preço dos Sensores Alternativos

O valor estimado para o sistema de monitoramento da qualidade de água foi realizado a partir do levantamento de preços das unidades utilizadas na confecção. Vale ressaltar que essa estimativa não leva em consideração a manutenção que o equipamento necessita para o desempenho eficiente no monitoramento.

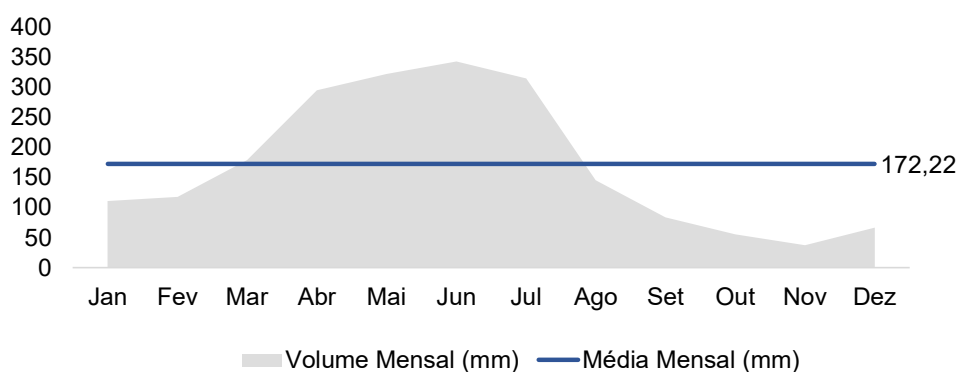
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ETAPA 1. DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA DE APROVEITAMENTO ÁGUA PLUVIAL

5.1.1 Estudo de Precipitação

A Figura 11 apresenta as médias mensais pluviométricas de 2011 a 2020 na cidade de Recife, sendo encontrado como média anual acumulada de 2066,64 mm.ano⁻¹ (APÊNDICE A). Avaliando as médias mensais constata-se que existem dois períodos com características de precipitação diferentes por ano, um período com o índice pluviométrico mais baixo (período seco) e outro mais alto (período chuvoso). Ou seja, períodos em que o empreendimento utilizará um maior volume de água da companhia de abastecimento.

Figura 11 - Médias pluviométricas 2011- 2020

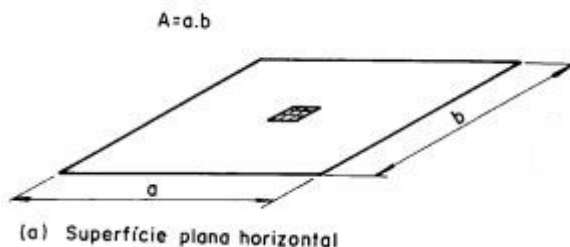


5.1.2 Potencial de Captação

Para o dimensionamento da vazão de projeto do sistema foi considerada a área de contribuição do empreendimento, avaliando a declividade do mesmo. De acordo com a NBR 10844:1989, a área da seção molhada considera o decaimento e a altura do telhado (Figura 13). Com base nisso, foi possível estimar a área da cobertura, de 301 m², considerando uma declividade próxima a zero. O local possui telhas do tipo térmica de aço.

O cálculo da área dessa cobertura seguiu a fórmula mostrada na Figura 12.

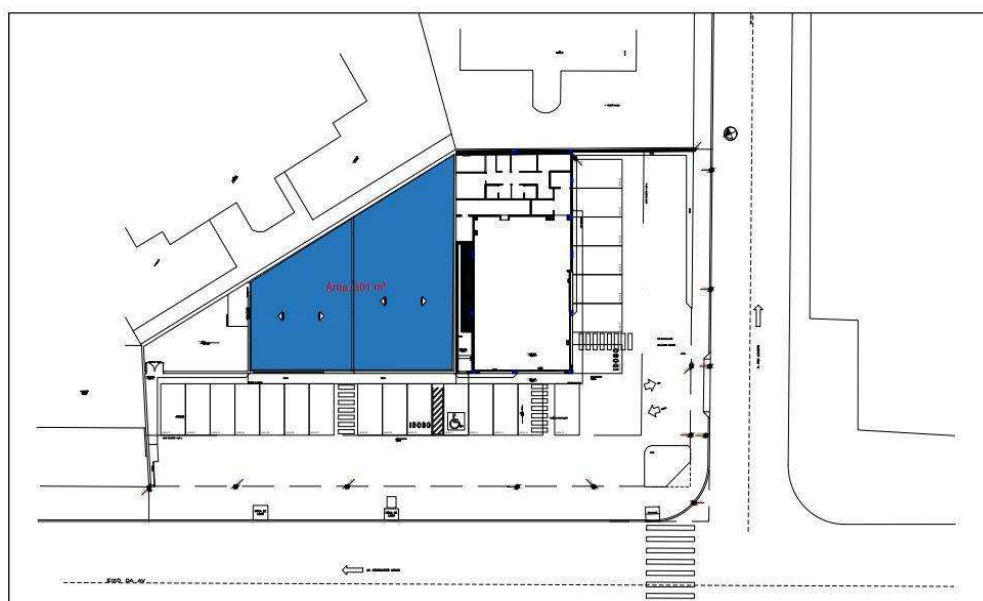
Figura 12 - Área de contribuição da cobertura



Fonte: ABNT (1989).

Além disso, para o cálculo da vazão de projeto (Equação 1), é necessário adotar um coeficiente de escoamento para a telha do tipo térmica de aço (Tabela 1), que possui uma variação de 0,80 a 0,90, sendo utilizado o valor de $C = 0,85$. Para a determinação dessa vazão é necessário além da área da superfície molhada, a média da intensidade pluviométrica mensal com base nos anos estudados (172,22 mm).

Figura 13 - Área do telhado do empreendimento



Fonte: autora.

Com a intensidade pluviométrica determinada para o projeto, assim como a área de contribuição de seção molhada e o coeficiente de escoamento, foi possível calcular a vazão de projeto, resultando em $44,06 \text{ m}^3.\text{mês}^{-1}$.

5.1.3 Consumo do Empreendimento Teórico

Conforme indicado no capítulo 4.1.3.3, a demanda teórica necessária para o funcionamento do empreendimento foi de $270,0 \text{ m}^3 \cdot \text{mês}^{-1}$. Esse volume foi o valor estimado de consumo de água, para ser utilizado no dimensionamento do reservatório, tendo em vista a necessidade do consumo contínuo do sistema.

5.1.4 Dimensionamento do Reservatório

Com a utilização dos dados de precipitação, a cobertura de captação e a demanda de água utilizada pela empresa, aplicou-se os métodos de Rippl, brasileiro, inglês e australiano para o dimensionamento do reservatório de armazenamento de água. Foram comparados os volumes obtidos conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Volumes do reservatório pelos métodos e suas características

Método	Volume máximo do reservatório (m³)	Tempo de enchimento (dias)	Tempo de esvaziamento (dias)	Volume ocioso (m³)
Rippl	161,79	93,63	17,80	109,95
Prático Brasileiro	156,76	90,72	17,42	104,92
Prático Inglês	31,10	18,00	3,46	-20,74
Prático Australiano	43,18	24,99	4,80	-8,66

Fonte: autora.

A Tabela 3 demonstra uma síntese dos resultados dos volumes dos reservatórios para cada simulação realizada por método aplicado. Observa-se que a aplicação dos métodos práticos inglês e australiano resultaram em um menor volume em comparação com o método de Rippl e o brasileiro.

Avaliando a tabela 3 é possível verificar que o dimensionamento pelo Método de Rippl e pelo Método Prático Brasileiro apresenta volume ocioso, que significa que no momento mais crítico, nas épocas secas, esse volume não será utilizado. Sendo assim, a utilização desses dois métodos não seria recomendada.

O Método Prático Australiano apresenta uma confiabilidade igual a zero (conforme a metodologia do método, Equação 11), devido a nenhum dos meses estudados a precipitação ser maior que o consumo mensal do empreendimento. Sendo assim, foi definido como o volume de reservação o que foi obtido pelo Método Prático Inglês, uma vez que o mesmo não possui volume ocioso e comporta o abastecimento por 3,46 dias se adequando ao que é estipulado pela NBR 5626 que prevê o mínimo de 1 dia, justificando a escolha de 31,10 m³ (ABNT, 2020).

5.2 ETAPA 2. ANÁLISE DO SISTEMA DE APROVEITAMENTO PLUVIAL

5.2.1 Consumo do Empreendimento Real

Ao analisar o consumo de água do empreendimento entre junho e dezembro de 2022 (sete meses), obteve-se os dados apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Histórico de consumo do empreendimento

Mês	Consumo de Água (m³)
Setembro/2022	238
Outubro/2022	207
Novembro/2022	273
Dezembro/2022	204
Janeiro/2023	194
Fevereiro/2023	155
Março/2023	170

Fonte: autora.

A média de consumo de água do empreendimento utilizado é de 205,9 m³.mês⁻¹.

5.2.2 Custo Adicional do Sistema

O sistema de abastecimento de água do empreendimento já levava em consideração duas bombas de recalque para elevar a água armazenada para a distribuição. Diante disso, o custo adicional energético para o aproveitamento de água

pluvial decorre da utilização de uma bomba pressurizadora (pressurizador vertical TDV24 - Dancor), para assim estimar o valor complementar de energia.

A bomba pressurizadora foi utilizada para aumentar a altura manométrica do sistema antes de passar pelo sistema de tratamento, sendo colocado na saída do reservatório elevado garantindo pressão adequada nas torneiras de distribuição.

Levando em consideração a tarifa TUSD – Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição R\$ 0,48866833 e TE – Tarifa de Energia R\$ 0,40737599 com um total de tarifa de R\$ 0,89604432, sem o adicional de bandeiras, o custo mensal de energia elétrica para a pressurização do sistema para os pontos de consumo é de R\$ 79,79.

5.2.3 Viabilidade Econômica

A economia estimada de água e esgoto com a utilização de água pluvial, tendo em vista a demanda hídrica do empreendimento ($205,9 \text{ m}^3.\text{mês}^{-1}$) foi de R\$ 1.218,29 por mês. Dessa forma, a empresa consegue economizar ao longo do ano um valor estimado de R\$ 14.619,48 anualmente (APÊNDICE B).

O valor estimado do sistema de aproveitamento pluvial e a sua automatização foi de R\$ 50.000,00, relacionando o custo total com a economia de R\$ 14.619,48 por ano, foi determinado um tempo de retorno de investimento de 3,42 anos.

Dessa forma há claramente uma viabilidade econômica significativa para o empreendimento, comprovando um sucesso na escolha pela utilização de água pluvial para o sistema de abastecimento pluvial.

5.2.4 Qualidade da Água do Sistema

O monitoramento da qualidade da água armazenada no reservatório do empreendimento foi compilado analisando a média das quatro coletas realizadas para os parâmetros físico-químicos e observando os resultados bacteriológicos de amostras de água do empreendimento. O mesmo foi realizado para as 6 amostras controle coletadas da torneira do jardim (amostra controle). Vale ressaltar que o empreendimento do estudo é abastecido em momentos distintos por água pluvial, água da COMPESA ou a mistura das duas e a amostra de água controle se localiza na área externa.

5.2.4.1 Resultados Físico-Químicos

Na Tabela 5 estão apresentados os resultados dos parâmetros físico-químicos (pH, condutividade, cor, turbidez, dureza total, alcalinidade total e cloretos) encontrados nas amostras coletadas do empreendimento do estudo e da torneira de jardim localizada na área externa da empresa.

Tabela 5 - Resultados físico-químicos

Parâmetro	Água antes do tratamento Plugow			Água tratada no Plugow			Torneira de jardim	VMP ¹
	COMPESA	Mistura	Pluvial	COMPESA	Mistura	Pluvial		
Alcalinidade Total mg CaCO ₃ .L ⁻¹	26,78±6,08	21,82	34,42	21,85±0,15	19,90	27,02	17,46±8,70	-
Cloretos mg Cl ⁻ .L ⁻¹	14,50	19,51	9,27	13,00	16,09	7,31	14,42±2,59	250,00
Dureza Total mg CaCO ₃ . L ⁻¹	25,50±9,50	22,00	23,00	26,00±9,00	20,00	17,00	23,00±6,57	300,00
pH	6,90-7,21	8,35	9,40	6,83-7,24	7,74	7,83	6,12-6,67	6,0-9,0
Cor Aparente (uH)	5,85±3,86	21,00	5,10	<2	<2	<2	27,46±16,27	15,00
Turbidez (uT)	0,45±0,45	1,00	0,10	0,00	0,00	0,00	2,86±3,23	5,00
Condutividade (µS.cm ⁻¹)	154,60±97,40	127,60	126,70	149,65±86,35	107,30	113,70	97,10±22,74	-

Legenda: ¹Valor Máximo Permitido de acordo com a Portaria de Portaria de Potabilidade N° 888 (2021)

Fonte: autora.

Tabela 6 - Resultados microbiológicos

Parâmetro	Água antes do tratamento Plugow			Água tratada no Plugow			Torneira de Jardim	Data da Coleta
	COMPESA	Mistura	Pluvial	COMPESA	Mistura	Pluvial		
Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)	-	-	7	-	-	Ausente	28	03/10/22
	17,1	-	-	Ausente	-	-	12	03/01/23
	-	>100	-	-	Ausente	-	1	10/01/23
	1	-	-	Ausente	-	-	Ausente	07/03/23
Presença de <i>E. coli</i> (UFC)	-	-	3	-	-	Ausente	1	03/10/22
	Ausente	-	-	Ausente	-	-	Ausente	03/01/23
	-	Ausente	-	-	Ausente	-	Ausente	10/01/23
	Ausente	-	-	Ausente	-	-	Ausente	07/03/23

Fonte: autora.

A Portaria de Consolidação Nº 5 alterada pela Portaria Nº 888 recomenda que o pH da água para o consumo humano esteja entre 6,0 e 9,0 (BRASIL, 2021). A análise dos resultados permite verificar que o pH da água tratada variou entre a faixa neutra e alcalina, mais precisamente entre os valores de 6,83 e 7,74. Avalia-se que a água proveniente da companhia de abastecimento da região possui uma característica mais ácida, diferente da fonte pluvial ou pluvial com a rede de abastecimento que se constitui mais alcalina. Dessa forma, a qualidade da água pluvial atende o recomendado na Portaria em sua totalidade quanto ao parâmetro citado, conforme pode ser verificado na Tabela 5.

O trabalho de Silva (2017), que monitorou a qualidade da água da chuva armazenada em cisternas de zonas rurais e urbanas, abordou a influência das condições de ocupação do solo, deposição seca e dos dispositivos de desvio. No referido trabalho, o pH encontrado se apresentava na faixa neutra a alcalina, e a autora relacionou a variação dos valores ao contato da água com a matéria orgânica, restos de animais e poeira, e a dissolução dessas substâncias ocasionando reações químicas responsáveis por essas variações, essas resoluções foram verificadas por outros autores como Jaques (2005) e Souza *et al.* (2011).

A variação da alcalinidade total média da água tratada para as amostras da COMPESA, Mistura e Pluvial foi $21,85 \pm 0,15$, 19,90 e 27,02 mg $\text{CaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$, respectivamente. Os resultados provenientes do empreendimento abastecido com água misturada e água pluvial, apresentaram valores superiores ao proveniente da fonte convencional. Esse fato é decorrente da construção recente do reservatório, que ainda recebe influência da dissolução de substâncias das superfícies de cimento, como carbonato de cálcio. Esse parâmetro tende a estabilizar ao longo do tempo (CARDOSO; SILVA; PÁDUA, 2005). A legislação brasileira não estabelece um valor de referência para alcalinidade e condutividade.

A condutividade média da água tratada identificada neste monitoramento para as amostras da COMPESA, Mistura e Pluvial foi $149,65 \pm 86,35$, 107,30 e 113,70 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, respectivamente. Silva (2017) monitorou sistemas de coleta de água de chuva presentes em ambientes urbanos, rurais e industriais, e a média encontrada na condutividade das águas no ambiente urbano foi de 45 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ e possuíam cisternas de placas de cimento com uma idade média de 10 anos. Essa característica explica

os valores superiores encontrados no presente trabalho, uma vez que o sistema é recém-construído.

Com relação à cor aparente, todas as amostras de água coletadas após o tratamento por barreira física possuíram seus valores em conformidade com a legislação, que prevê 15 uH como valor máximo padrão (BRASIL, 2017). Porém, considerando as amostras de água antes do tratamento foi observado que a água misturada apresentou valor maior que o permitido, e comparando com a água de chuva que apresentou o menor valor entre os três tipos de amostras existe uma relativa diferença entre as duas amostras. É importante destacar que a água proveniente do sistema convencional (amostra controle), em 60% das amostras coletadas, apresentou teor de cor acima do limite permitido por legislação. (Figura 14).

Figura 14 - Amostras de água após e antes do tratamento (COMPESA) e do controle



Fonte: autora.

A variação da média dos valores para cloretos foi de 7,31 a 16,09 e 9,27 a 19,51 $\text{mg Cl}^-\cdot\text{L}^{-1}$ para água tratada e não tratada, respectivamente. Enquanto para dureza total os valores médios variaram entre 17,00 a $26,00 \pm 9,00$ e 22,00 a $25,50 \pm 9,50$ $\text{mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ para água tratada e não tratada, respectivamente, dessa forma os dois parâmetros se enquadram abaixo dos limites máximos previstos pela Portaria Nº 888 que prevê como valores máximos para cloretos e dureza 250 $\text{mg Cl}^-\cdot\text{L}^{-1}$ e 300 $\text{mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$, respectivamente.

5.2.4.2 Resultados Bacteriológicos

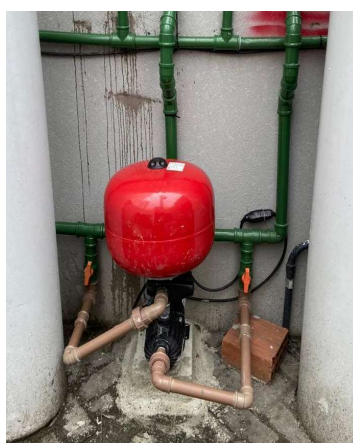
Na tabela 6 encontram-se os resultados dos parâmetros microbiológicos (coliformes termotolerantes e presença de *E. coli*) medidos nas amostras coletadas nas quatro coletas realizadas do empreendimento.

Comparando as amostras analisadas da água tratada e avaliando os resultados das amostras antes do tratamento foi possível observar uma eficiência na remoção de patógenos comprovando a eficácia do sistema empregado no empreendimento. Os resultados para as amostras após o tratamento para os parâmetros avaliados se adequam aos padrões de potabilidade previstos na Portaria N° 888 que prevê a ausência para esses dois parâmetros (BRASIL, 2021). Foi detectada a presença de coliformes em 3 amostras e a presença de *E. coli* foi perceptível em apenas 1 nas amostras coletadas no ponto de coleta controle, foi observado a ausência na maioria das amostras analisadas para o parâmetro presença de *E.coli*.

5.2.5 Gestão e Gerenciamento do Sistema

Desde a instalação do sistema de tratamento utilizado para a distribuição de água do reservatório misto que utiliza como fonte de abastecimento o sistema de abastecimento de água convencional e a água de chuva, foram relatados pelos funcionários do empreendimento a baixa pressão nos pontos de consumo. Diante disso, fez-se necessário a adição de uma motobomba pressurizadora (Figura 15) antes do tratamento, com a finalidade de aumentar a pressão no ponto de consumo.

Figura 15 - Motobomba pressurizadora



Fonte: autora.

Além disso, a falta de conhecimento acerca do sistema alternativo de abastecimento ocasionou na contaminação da caixa de drenagem do estabelecimento, decorrente de gorduras descartadas na mesma (Figura 16). Esse fato foi constatado pelo mau cheiro no ponto de consumo relatado pelos funcionários. O costume popular de descartar resíduos na rede de drenagem ocasionou em uma problemática no sistema como um todo. A caixa de drenagem leva para o desvio que descarrega no reservatório, com isso, foi necessária a limpeza de todo o sistema de drenagem, desvio do 1º mm e reservatório. Fez-se indispensável a educação ambiental acerca do sistema sobre os problemas para evitar novas contaminações.

Figura 16 - Caixa de drenagem antes (A) e depois (B)



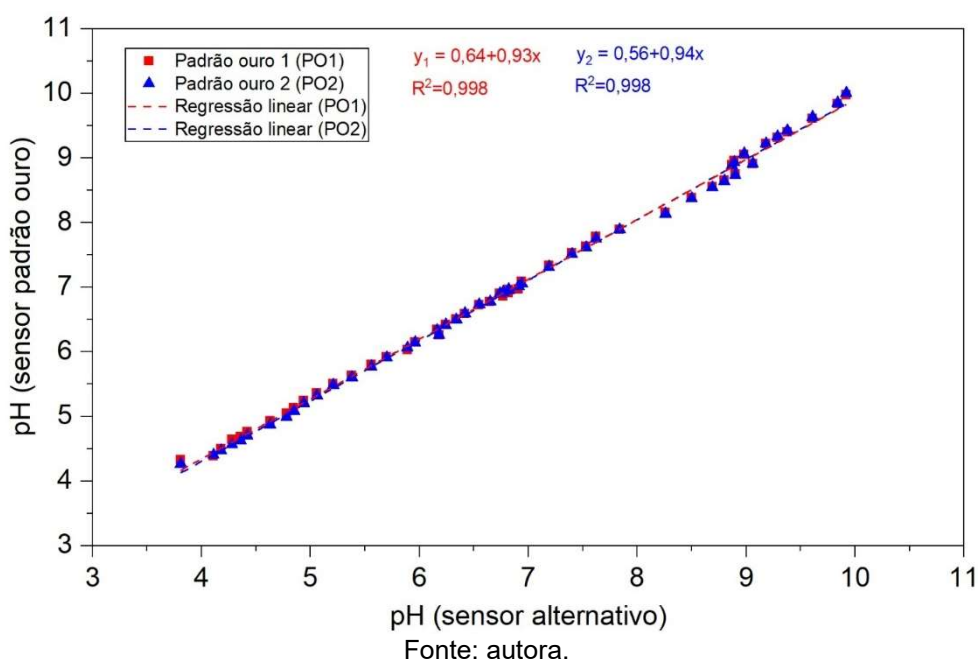
Fonte: autora.

5.3 ETAPA 3. DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE SENSORES PARA MONITORAMENTO REMOTO DA QUALIDADE DA ÁGUA

5.3.1 Testagem e Análise de Dados

A primeira verificação do comportamento do sensor foi feita através da comparação dos resultados medidos com o sensor desenvolvido com os obtidos com equipamentos que denominamos de padrão-ouro 1 e 2, que são equipamentos de bancada do laboratório. Foram feitas medições de amostras com diferentes valores de pH (Figura 17). As leituras foram realizadas com 50 amostras diferentes entre si. O coeficiente de determinação foi de $R^2=0,998$, indicando que as medições realizadas pelo sensor de pH possuem uma correlação linear positiva com as medidas pelo equipamento padrão-ouro 1 e 2. Adicionalmente, o coeficiente de Pearson encontrado através da comparação das duas variáveis foi de $r=0,999$, confirmando que os sensores possuem de fato uma relação positiva entre si.

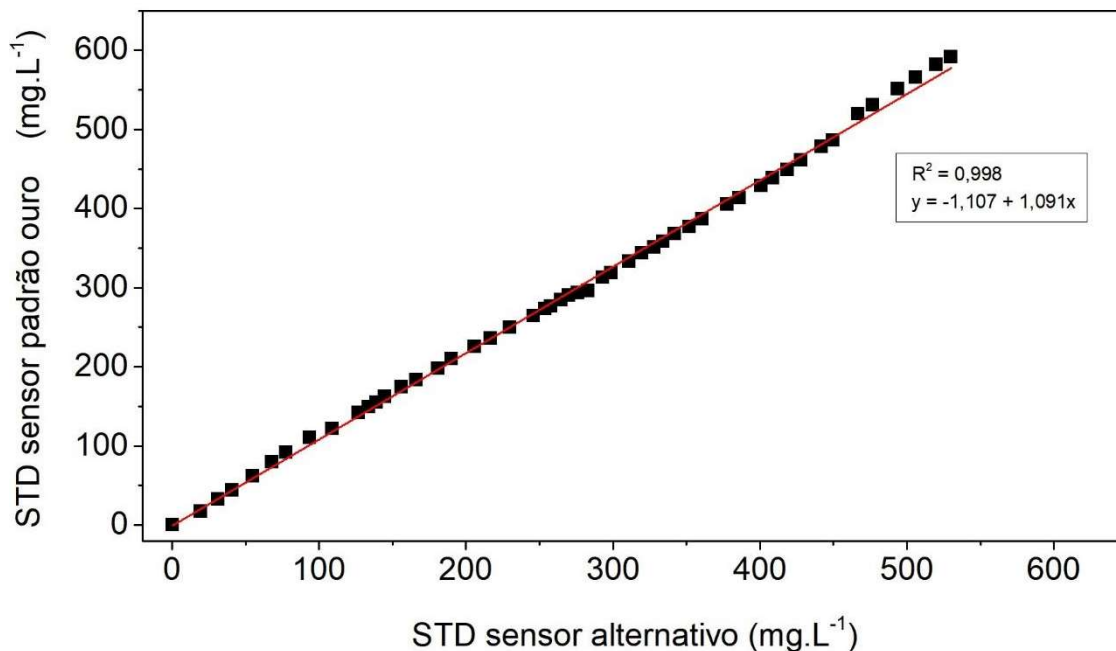
Figura 17 - Correlação entre as leituras de pH do sensor padrão-ouro 1 e 2 e alternativo



As leituras realizadas de STD com 50 amostras de concentração diferentes foram realizadas com um equipamento padrão-ouro e com o sensor alternativo (Figura 18). Utilizando o coeficiente de determinação para avaliar a qualidade de ajuste de dados obteve-se um $R^2=0,998$, enquanto o coeficiente de Pearson obtido foi de

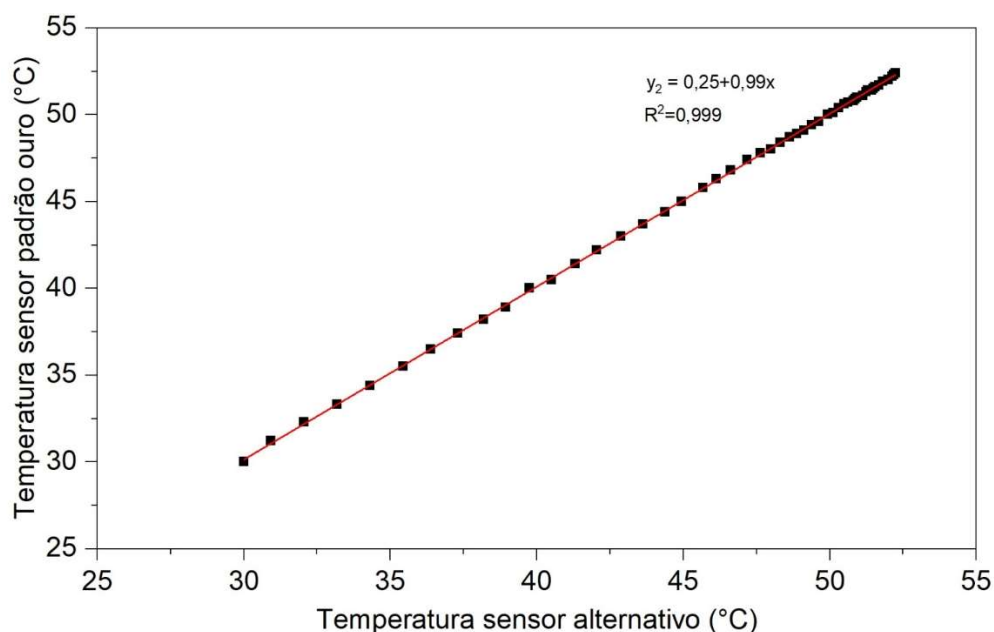
0,9991. Também para o sensor de STD se demonstra haver uma correlação linear e positiva forte entre os sensores para medição de sólidos totais dissolvidos.

Figura 18 - Correlação entre as leituras de STD do sensor padrão-ouro e alternativo



Para as leituras de temperatura utilizou-se um termômetro padrão-ouro e o sensor alternativo nas 50 amostras. A cada 2 minutos foram realizadas as leituras com os dois dispositivos. Para essa variável, os sensores também apresentaram uma forte correlação linear (positiva), demonstrada pelos altos valores de coeficiente de determinação ($R^2=0,999$) e coeficiente de Pearson ($r=0,9999$) (Figura 19).

Figura 19 - Correlação entre as leituras de temperatura do sensor padrão-ouro e alternativo



Fonte: autora.

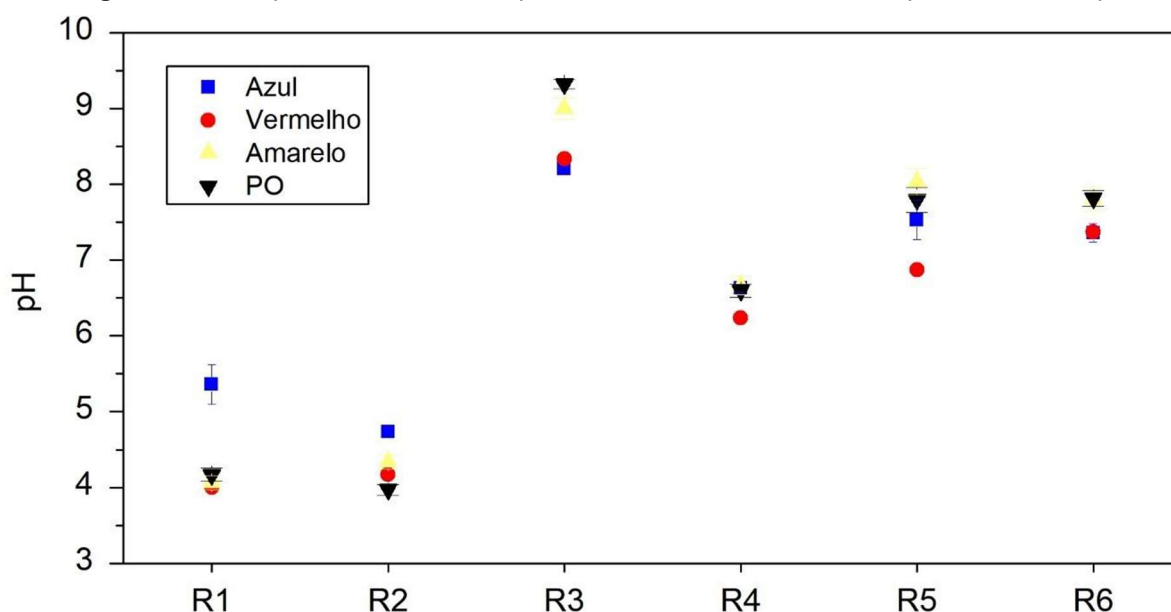
Após a análise dos resultados encontrados, através da comparação de medição dos parâmetros físico-químicos, pH, sólidos totais dissolvidos e temperatura, utilizando o sensor alternativo e sensores padrão-ouro, nota-se que os coeficientes de determinação e de Pearson encontrados nesta etapa da pesquisa, indicam boa funcionalidade e confiabilidade do protótipo desenvolvido.

A segunda verificação levou em consideração a repetição das leituras, sendo utilizado para essa fase, 3 novos dispositivos desenvolvidos em laboratório e um dispositivo padrão-ouro para cada parâmetro analisado. O parâmetro de temperatura não foi utilizado nesta testagem, sendo avaliados apenas pH e STD. Foram preparadas seis amostras com diferentes valores de pH e outras seis amostras com diferentes concentrações de sólidos totais dissolvidos.

A Figura 20 apresenta os resultados obtidos comparando as leituras de cada sensor alternativo (azul, vermelho, amarelo) e o sensor padrão-ouro (PO) de pH, para cada um dos seis recipientes (R1-R6), contendo diferentes amostras. Pode-se inferir que o sensor azul apresentou uma maior discrepância dentre os sensores avaliados, sendo obtida uma média de medições do pH de $5,36 \pm 0,26$ no R1. Esse valor é 27% maior que a média obtida pelo sensor padrão-ouro, de $4,17 \pm 0,09$ no mesmo ponto de análise, comprovando haver uma diferença significativa entre estes sensores que, em geral, se repetiu nos outros recipientes contendo outras amostras.

Para o sensor vermelho, o mesmo apresentou uma maior diferença nas medições para a amostra R3, possuindo uma média de $8,33 \pm 0,09$. Esse valor é relativamente menor que o obtido pelo sensor padrão-ouro, de $9,32 \pm 0,06$. Considerando todas as medições realizadas nas seis amostras avaliadas, o sensor amarelo foi o que demonstrou a maior proximidade com as leituras do PO, apresentando a maior diferença no R3, com a média de $9,00 \pm 0,14$, enquanto o PO apresentou uma média de $9,32 \pm 0,06$.

Figura 20 - Comparativo das leituras para cada sensor alternativo e o padrão-ouro de pH



Fonte: autora.

Após essa avaliação foi aplicado o método estatístico de análise de variância (ANOVA) que analisa a variância para os dados de pH por amostras (R1-R6) para os sensores alternativos e o PO (Tabela 7). Analisando a Tabela 7, foi observado que todos os valores de F calculados foram maiores que os valores críticos (F crítico), para todas as amostras avaliadas. Adicionalmente, todos os *p*-valor apresentaram valores menores que 0,05 (significância). Isso indica que a hipótese nula é falsa, ou seja, as médias de pH avaliadas para cada amostra são significativamente diferentes, quando foram avaliados os quatro sensores juntos.

Tabela 7 - Análise de variância (ANOVA) para dados de pH por recipiente para todos os sensores

Amostras	F	F crítico	p-valor
R1	22,27	3,07	<0,001
R2	45,90	2,92	<0,001
R3	70,00	2,92	<0,001
R4	9,72	2,92	0,005
R5	10,29	2,92	0,003
R6	8,43	2,92	0,007

Fonte: autora.

Apesar de as médias terem sido significativamente diferentes quando se compara os quatro sensores juntos, foi observado que os valores obtidos através do sensor amarelo apresentaram relativa proximidade com os valores medidos pelo padrão-ouro (Figura 20), dessa forma, uma nova análise de variância foi realizada apenas para as medições utilizando os sensores amarelo e padrão-ouro (Tabela 8).

Os resultados obtidos através da análise de variância (ANOVA) utilizando apenas as medições do sensor amarelo e padrão-ouro, indicam que as médias, em geral, não possuem diferença estatística, ou seja, os sensores apresentaram medições similares ($F < F$ crítico e $p\text{-valor} > 0,05$), exceto para a amostra do recipiente 3, quando o F obtido foi maior que o crítico e o p -valor ficou abaixo de 0,05.

Tabela 8 - Análise de variância (ANOVA) para dados de pH por recipiente para sensor amarelo e PO

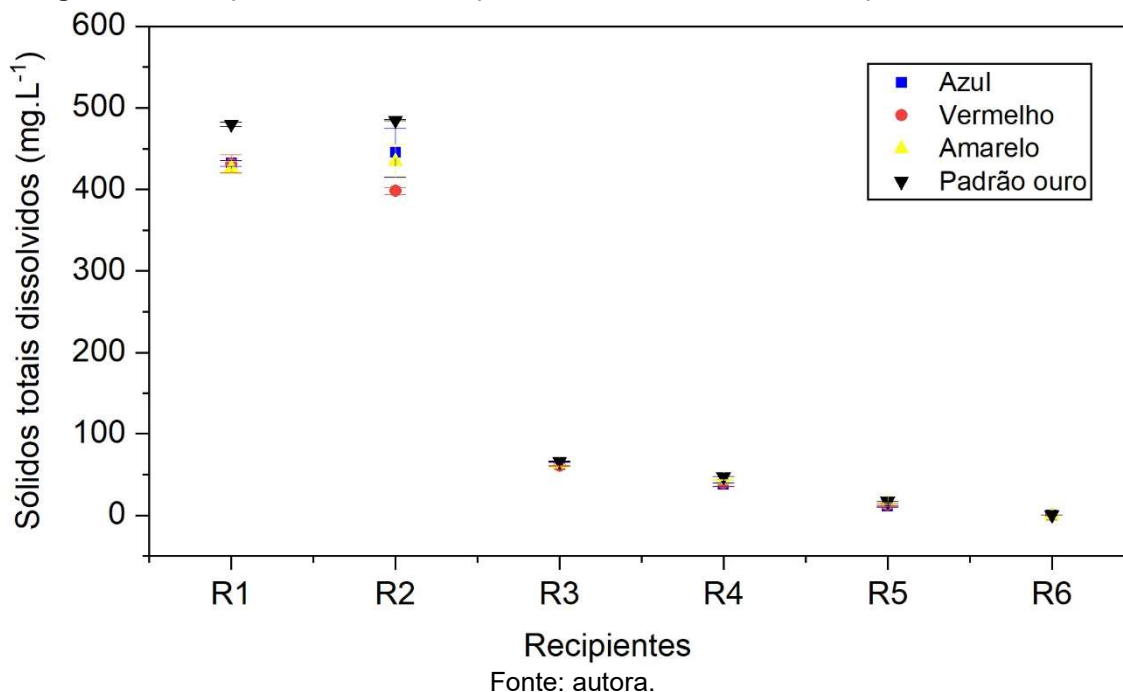
Amostras	F	F crítico	p-valor
R1	0,90	10,13	0,414
R2	5,95	18,51	0,135
R3	15,28	10,13	0,030
R4	0,44	7,71	0,544
R5	2,10	7,71	0,221
R6	0,01	7,71	0,926

Fonte: autora.

Com relação ao parâmetro de STD, observa-se que para amostras com baixas concentrações de sólidos totais dissolvidos, os sensores apresentaram relativa proximidade nas medições. No entanto, para concentrações mais altas, os valores medidos foram mais discrepantes, a exemplo disso o sensor, como observado nas amostras do R1 e R2, conforme Figura 21. Para o R1, os sensores azul, vermelho e amarelo apresentaram médias de $432,0 \pm 4,6$, $431,3 \pm 13,4$ e $426,7 \pm 9,8$, enquanto a média de medições do sensor PO foi de $480,0 \pm 3,0$. Para o R2 foi verificado a maior

disparidade do sensor vermelho, com uma média de $398,0 \pm 5,3$. Esse valor foi relativamente menor que o obtido pelo sensor PO, de $485,0 \pm 1,0$.

Figura 23 - Comparativo das leituras para cada sensor alternativo e o padrão-ouro de STD



A análise de variância (ANOVA) também foi realizada para os dados de sólidos totais dissolvidos (STD), os quais foram obtidos através da medição dos sensores alternativos e o PO das seis amostras contendo diferentes concentrações de STD. Analisando a Tabela 9, observa-se que os valores de F calculados foram maiores que os valores críticos (F crítico), para as amostras R1, R2, R4, R5 e R6. Adicionalmente, para estes recipientes, os *p*-valor apresentaram valores menores que 0,05, indicando que a hipótese nula é falsa, ou seja, as médias diferem entre si, quando se avalia os resultados obtidos pelos quatro sensores. Por outro lado, para a amostra contida no R3, o F calculado foi menor que o crítico e o *p*-valor=0,144, ou seja, as médias para essa condição não demonstraram diferenças estatísticas. Avaliando o R6, observa-se que o F foi discrepante em relação aos demais resultados, isso se explica pela variabilidade das médias dos grupos ser alta em relação à variabilidade intragrupo, o mesmo ocorre com o R6 da tabela 10.

Tabela 9 - Análise de variância (ANOVA) para dados de STD por recipiente para todos os sensores

Recipiente	F	F crítico	p-valor
R1	24,68	2,92	<0,001
R2	7,66	2,92	0,010
R3	2,39	2,92	0,144
R4	8,74	2,92	0,007
R5	9,27	2,92	0,006
R6	1.744,32	2,92	<0,001

Fonte: autora.

Através da comparação dos valores obtidos para os diferentes sensores avaliados, observou-se que o sensor amarelo foi aquele que apresentou as medições mais próximas dos valores obtidos pelo sensor padrão-ouro, dessa forma, uma nova análise de variância foi realizada considerando as médias obtidas apenas por estes dois sensores. Através da Tabela 10, conclui-se que os valores de F calculados foram maiores que os valores críticos, para as amostras R1, R2, R4, R5 e R6, além de apresentarem *p*-valor menor que conclusão 0,05, nos indicando que as médias de STD são significativamente diferentes. Por outro lado, para o R3, as médias foram significativamente iguais ($F < F_{\text{crítico}}$ e $p\text{-valor} > 0,05$).

Tabela 10 - Análise de variância (ANOVA) para dados de STD por recipiente para sensor amarelo e PO

Recipiente	F	F crítico	p-valor
R1	32,23	18,52	0,030
R2	11,63	7,71	0,027
R3	2,00	10,13	0,252
R4	159,07	7,71	<0,001
R5	17,09	7,71	0,014
R6	1.744,00	7,71	<0,001

Fonte: autora.

Através das análises de variância (ANOVA) realizadas, foi possível verificar que as medições de pH e STD foram significativamente diferentes, quando comparadas conjuntamente. Quando avaliados apenas os sensores amarelo e padrão-ouro (PO) para os dados de pH, a ANOVA indica que em 5 das 6 amostras, as medições entre os dois sensores foram relativamente iguais. Para as medições de STD, as avaliações conjuntas dos sensores e avaliação particular dos sensores amarelo e PO, foi possível

concluir que, estatisticamente, as medições foram significativamente diferentes, exceto para a amostra contida no R3. Isso nos indica que foi possível realizar medições acuradas utilizando sensor alternativo, quando comparamos com um sensor padrão-ouro, em especial para medições de pH. Além disso, para medições de sólidos totais dissolvidos, apesar de a ANOVA indicar que as médias das medições obtidas entre os sensores foram, em geral, significativamente diferentes, quando comparamos as diferenças entre as medições, essas são relativamente pequenas, exceto para concentrações de sólidos mais elevadas.

Os sensores serão destinados à medição dos teores de água de chuva que, segundo a literatura para o parâmetro de pH, variam de 6,31 a 7,98 para águas da zona rural e de 4,1 a 7,9 para águas da zona urbana (SILVA *et al.*, 2017 e FARIAS, 2012). Os valores das amostras em que todos os sensores (azul, vermelho e amarelo) obtiveram melhores respostas foi entre $4,2 \pm 0,04$ a $8,03 \pm 0,17$; ou seja, os sensores alternativos se adequam à qualidade da água tanto em ambiente urbano como rural, tratando-se de água da chuva, e a legislação prevê que para consumo humano a água deve estar entre 6,0 e 9,0 (BRASIL, 2017).

Para STD a Portaria Nº 888 prevê um valor máximo de 500 mg.L^{-1} (BRASIL, 2021), o trabalho de Sousa *et al.*, 2011 apresentou valores de 35,4 a $65,2 \text{ mg.L}^{-1}$ e no trabalho de Lima, 2012 apresentou valores de $63,8 \pm 24,7$ a $130,2 \pm 86,3 \text{ mg.L}^{-1}$ para dois municípios estudados, os autores avaliaram a qualidade da água da chuva em seus estudos. Comparando esses valores com a análise do comportamento dos sensores é possível perceber que os sensores tiveram um desempenho melhor entre as amostras R3-R6 para os 3 sensores alternativos, com concentrações de 0,0 até $62,7 \pm 4,2$, se aproximando dos valores encontrados para água pluvial. Dessa forma, os sensores se adequam bem para a qualidade da água que se pretende monitorar.

5.3.2 Estimativa de Preço dos Sensores Alternativos

A precificação do produto desenvolvido em laboratório para atuar como um sistema de monitoramento da qualidade em tempo real, foi efetuada com base na pesquisa de preço encontrada comercialmente, comparando o valor do sistema completo com o valor comercial. Vale ressaltar que existem unidades do sistema de sensor não estimado, pois depende do local de instalação. Dessa forma, o preço médio do sistema encontrados comercialmente está previsto na Tabela 11.

Tabela 11 - Valores médios encontrados comercialmente dos equipamentos

Equipamentos	Valor Unitário (R\$)
pH	1.584,00
Temperatura	207,90
STD	197,93
Total	1.989,83

Fonte: autora.

A mão de obra não foi estimada no valor total, tendo em vista que os valores comercialmente empregados para cada sensor são valores maiores que o conjunto dos sensores desenvolvidos (Tabela 12). Dessa forma, conseguimos obter um valor comercialmente competitivo, possuindo potencial de aderir ao sistema implantado no empreendimento que utiliza água de chuva como fonte complementar de abastecimento.

Tabela 12 - Precificação do sensor alternativo

Equipamentos	Valor Unitário (R\$)
Sensor TDS	99,23
Sensor pH	258,90
Sensor temperatura	16,80
ESP32 WROOM 32D	41,90
Fonte 7.5V, 1A	19,71
ESP32 Devkit	54,99
Arduino nano	89,90
Conversor RS-485.	8,90
Verniz	32,90
Impressão	245,00
Placa	203,51
Fiação	450,00
Total	1.521,74

Fonte: autora.

6 CONCLUSÃO

A aplicação de diferentes métodos de dimensionamento de reservatórios resultou na escolha do método inglês para dimensionamento do reservatório de acumulação de água de chuva do empreendimento, que é objeto de estudo deste trabalho. O volume resultante de $31,10 \text{ m}^3$ deve ser suficiente para suprir uma demanda de 270 m^3 mensalmente, sendo a água de chuva proveniente de um telhado de 301 m^2 , considerando a pluviometria média mensal da região de $172,33 \text{ mm}$, conforme dados da Agência Pernambucana de Águas e Climas.

A qualidade da água do sistema foi analisada em 4 coletas com amostras tratadas no sistema de filtração adquirido do mercado, sem tratamento e um controle, representado pela água de abastecimento de um empreendimento próximo. As amostras tratadas estavam dentro dos limites estabelecidos pela legislação brasileira para água potável.

Além disso, em termos de viabilidade econômica a implantação do sistema de aproveitamento pluvial no local estudado gerou para o empreendimento uma economia de R\$ 14.619,48 anualmente, resultando em um tempo de retorno do investimento de 3,42 anos.

A utilização desse sistema alternativo de abastecimento de água em um empreendimento da área urbana possibilitou a identificação de problemas de utilização do sistema, devido à cultura de comparar a água de chuva com o esgoto. Foi identificada uma contaminação no reservatório de armazenamento de água de chuva, ocasionada pelo despejo de gordura no local. Isso é decorrente da falta de conhecimento com relação a qualidade dessa água.

Identificando a problemática de controle da qualidade em tempo real, foram desenvolvidos sensores de monitoramento da qualidade da água pelo LACETI-UFPE. Os sensores desenvolvidos para medição de pH e STD apresentaram sensibilidade de detecção estatisticamente aceitáveis na faixa de contaminação comumente encontrada para água de chuva, quando comparados com sensores de mercado usados em laboratório. Destaca-se que para valores de STD na faixa de $480,0 \pm 3,0$ a $485,0 \pm 1,0$ os sensores desenvolvidos não apresentaram semelhança com os de laboratório (valores), devendo seu uso, portanto, estar restrito à medição da qualidade da água de chuva, cujos valores de contaminação estão dentro da faixa de segurança.

Do ponto de vista financeiro, os sensores desenvolvidos foram 30,76% mais baratos que os de mercado. Os valores devem diminuir cada vez mais, à medida que há o escalonamento da produção.

REFERÊNCIAS

ABBASI, T.; ABBASI, S. A. Sources of Pollution in Rooftop Rainwater Harvesting Systems and Their Control. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, vol. 41, no 23, p. 2097–2167, dez. 2011. <https://doi.org/10.1080/10643389.2010.497438>.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10844** - Instalações prediais de águas pluviais. Rio de Janeiro. 1989.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.214**: Projeto de sistema de bombeamento de água. Rio de Janeiro. 1992.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15527** – Aproveitamento de Água de Chuva de Coberturas para Fins Não Potáveis. Rio de Janeiro. 2019.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5626** - instalação predial de água fria. Rio de Janeiro . 2020.

ALI, M.; NELSON, A. R.; LOPEZ, A. L.; SACK, D. A. Updated Global Burden of Cholera in Endemic Countries. **PLOS Neglected Tropical Diseases**, vol. 9, nº 6, 4 jun. 2015. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0003832>.

ALVES, F.; KÖCHLING, T.; LUZ, J.; SANTOS, S. M.; GAVAZZA, S. Water quality and microbial diversity in cisterns from semiarid areas in Brazil. **Journal of Water and Health**, v. 12, n. 3, p. 513–525, 2014.

ANA, AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS; FIESP, FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO; SINDUSCON, SINDICATO DA CONSTRUÇÃO CIVIL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Conservação e reuso de água em edificações**. São Paulo: prol editora gráfica. 2005. 152 p.

ANDRADE NETO, C. O. Segurança Sanitária das Águas de Cisternas Rurais. In: **Simpósio Brasileiro de Captação e Manejo de Água de Chuva. Anais...**Juazeiro-BA: 2003

ANDRADE NETO, C. O. Proteção Sanitária das Cisternas Rurais. **Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, n. 1, p. 7, 2004.

ANDRADE NETO, C. O. Aproveitamento imediato da água de chuva. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 1, n. 1, p. 73–86, 2013.

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA. **Monitoramento Pluviométrico**. Disponível em:

<<http://old.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php#>>. Acesso em: 21 set. 2023.

APHA, AWWA and WPCF. Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater, 25th ed. Baltimore. Port City Press, 2017

ARFELLI, F.; CIACCI, L.; VASSURA, I.; PASSARINI, F. Nexus analysis and life cycle assessment of regional water supply systems: A case study from Italy. **Resources, Conservation and Recycling**, vol. 185, p. 106446, out. 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106446>.

ARTICULAÇÃO SEMIÁRIDO BRASILEIRO. Programa um milhão de cisternas. 2023. **Articulação Semiárido Brasileiro**. Disponível em:
<https://www.asabrasil.org.br/acoes/p1mc>>. Acessado em: 10 jan. 2023.

BASHAR, M. Z. I.; KARIM, M. R.; IMTEAZ, M. A. Reliability and economic analysis of urban rainwater harvesting: A comparative study within six major cities of Bangladesh. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 133, n. June 2017, p. 146–154, 2018.

BRASIL. **Delimitação do semiárido**. Ministério da Integração Nacional, v. 73, p. 32–34, 2017a.

BRASIL. **Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021**. Disponível em:
http://portalsinan.saude.gov.br/images/documentos/Legislacoes/Portaria_Consolidacao_5_28_SETEMBRO_2017.pdf>. Acesso em: 29 dez. 2022b.

BRASIL. **Lei Federal nº 9.433**, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal e altera o art. 1º da Lei 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília, 1997

CAMPISANO, A.; BUTLER, D.; WARD, S.; BURNS, M. J.; FRIEDLER, E.; DEBUSK, K.; FISHER-JEFFES, L. N.; GHISI, E.; RAHMAN, A.; FURUMAI, H.; HAN, M. Urban rainwater harvesting systems: Research, implementation and future perspectives. **Water Research**, vol. 115, p. 195–209, maio 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.02.056>.

CARDOSO, M.P., SILVA, C.V., PÁDUA, V. L. Captação de água de chuva em cisternas, verificação do potencial de alumínio e seu efeito sobre a saúde. In: **Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Anais...Campina Grande: 2005

CARLON, M. R. **Percepção dos atores sociais quanto às alternativas de implantação de sistemas de captação e aproveitamento de água de chuva em Joinville - SC**. 2005, Joinville, 203 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental. Ecossistemas Aquáticos) - UNIVALI, Itajaí, 2005.

CARVALHO, JULIO LUZ, J. R. S.; SANTOS, S. M.; GAVAZZA, S. A PVC-pipe device as a sanitary barrier for improving rainwater quality for drinking purposes in the Brazilian semiarid region. **Journal of Water and Health**, v. 16, n. 3, p. 391–402, 2018.

CHEN, H. X.; ZHANG, L. M. A physically-based distributed cell model for predicting regional rainfall-induced shallow slope failures. **Engineering Geology**, vol. 176, p. 79–92, jun. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.04.011>.

CILENTO, F. C. **Soluções para o aproveitamento de água pluvial em edificações existentes por meio do desenvolvimento de reservatórios de descarte e armazenamento**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2009.

CUSTÓDIO, D. A. C. **Influência do Aproveitamento de Água Pluvial em Edificações Residenciais na Drenagem Urbana de Joinville/Sc**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.

DE SÁ SILVA, ANA CAROLINA; BIMBATO, ALEX MENDONÇA; PERRELLA BALESTIERI, JOSÉ ANTÔNIO; NOGUEIRA VILANOVA, M. R. Exploring environmental, economic and social aspects of rainwater harvesting systems: A review. **Sustainable Cities and Society**, v. 76, p. 103475, 2022.

EL-SAYED, A.; KAMEL, M. Climatic changes and their role in emergence and reemergence of diseases. **Environmental Science and Pollution Research**, vol. 27, nº 18, p. 22336–22352, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08896-w>.

FAO - Food and Agriculture Organization. **Water scarcity**, 2022. <https://wellawareworld.org/the-water-crisis/?utm_source=Google&utm_medium=cpc&gclid=EAlaIQobChMlt8Tdge7O_AlViBhMCh2sUQJEEAAYAAEgL_x_D_BwE>. Acesso em: 10 de outubro de 2022.

FARIAS, M. M. M. W. E. C.. **Aproveitamento de águas de chuva por telhados: aspectos quantitativos e qualitativos**. Caruaru, PE, 2012. 115 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Engenharia Civil e Ambiental, 2012

FLÖRKE, M.; SCHNEIDER, C.; MCDONALD, R. I. Water competition between cities and agriculture driven by climate change and urban growth. **Nature Sustainability**, vol. 1, nº 1, p. 51–58, 8 jan. 2018. <https://doi.org/10.1038/s41893-017-0006-8>.

FRENI, G.; LIUZZO, L. Effectiveness of Rainwater Harvesting Systems for Flood Reduction in Residential Urban Areas. **Water**, vol. 11, nº 7, p. 1389, 6 jul. 2019. <https://doi.org/10.3390/w11071389>.

FUNASA, Fundação Nacional de Saúde. **Manual de Saneamento**. Brasília - DF, p. 407, 2006.

GODSKESEN, B.; HAUSCHILD, M.; RYGAARD, M.; ZAMBRANO, K.; ALBRECHTSEN, H.-J. Life-cycle and freshwater withdrawal impact assessment of

water supply technologies. **Water Research**, vol. 47, nº 7, p. 2363–2374, maio 2013. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.02.005>.

GOULD, J.; NISSEN-PETERSEN, E. **Rainwater catchment systems for domestic supply - design, construction and implementation**. London, p.356, 2002 London.

GOULD, J. Is rainwater safe a drink? A review of recent findings. In: **International rainwater catchment systems conference: rainwater catchment an answer to the water scarcity of the next millenium**. Anais...Petrolina - PE: 1999

HAGEMANN, S. E. **Avaliação da Qualidade da água da chuva e da viabilidade de sua captação e uso**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, 2009.

JACOBI, P. R.; EMPINOTTI, V. L.; SCHMIDT, L. Water Scarcity and Human Rights. **Ambiente & Sociedade**, vol. 19, nº 1, mar. 2016. <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoceditorialv19i2016>.

JAQUES, R. C. **Qualidade da Água de Chuva no Município de Florianópolis e sua Potencialidade para aproveitamento em edificações**. 2005, p. 102. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Florianopolis-SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

JUNIOR, J. C. R.; PAIVA, A. L. R.; MOTTERAN, F.; OLIVEIRA, L. M. M.; FILHO, J. A. S.; PESSOA, J. O. Variância de parâmetros de qualidade da água e análise de agrupamentos na bacia hidrográfica do rio Goiana, Pernambuco. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 6, p. 18, 2022.

KATO, M. T. Qualidade da água de cisternas utilizadas para fins de consumo humano no município de Poço Redondo - SE. In: **Seminário Internacional de Engenharia da Saúde Pública**. Anais...Fortaleza-CE: FUNASA, 2006

KE, Z.; HONG, W.; JIANXING, L.; YUGUANG, Z.; FANGPING, C.; ZHENGJUN, Y. Deformation and failure mechanism of colluvial landslide under sustained rainfall-a case study of Xinzhan landslide in Tongzi County, China. **Alexandria Engineering Journal**, vol. 71, p. 89–103, maio 2023. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.03.044>.

KRAMER, M. TERHEIDEN, K. WIEPRECHT, S. Safety criteria for the traffic ability of inundated roads in urban floodings. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 17, p. 77–84, 2016.

LEAL, U. Ciclo da água na edificação. **Téchne**. v.9, n 48, p. 45-46, 2000.

LIBÂNIO, P. A. C.; CHERNICHARO, C. A. DE L.; NASCIMENTO, N. DE O. A dimensão da qualidade de água: avaliação da relação entre indicadores sociais, de disponibilidade hídrica, de saneamento e de saúde pública. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 10, n. 3, p. 219–228, 2005.

LIMA, J. C. A. L. . **Avaliação do desempenho de dispositivo de desvio das primeiras águas de chuva utilizado em cisternas no semiárido pernambucano.** Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos), Recife- PE: Universidade Federal de Pernambuco, 2012.

MARINOSKI, A. K. **Aproveitamento de água pluvial para fins não potáveis em instituição de ensino: estudo de caso em Florianópolis – SC.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) -Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

NASERISAFABI, N.; YAGHOUBI, E.; SHARMA, A. K. Alternative water supply systems to achieve the net zero water use goal in high-density mixed-use buildings. **Sustainable Cities and Society**, vol. 76, p. 103414, jan. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103414>.

PALHARES, J. C. P. Captação de água de chuva e armazenamento em cisterna para uso na produção animal. **Embrapa Pecuária Sudeste**, 2016.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 2. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006.

RAINDROPS, G. **Aproveitamento de água da chuva**. 1ª edição ed. Curitiba, 2002.

SANTOS, S. M. ; FARIAS, M. M. M. W. E. C. Potential for rainwater harvesting in a dry climate: Assessments in a semiarid region in northeast Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 164, p. 1007–1015, 2017.

SCHUETZE, T. Rainwater harvesting and management – policy and regulations in Germany. **Water Supply**, vol. 13, nº 2, p. 376–385, 1 mar. 2013. <https://doi.org/10.2166/ws.2013.035>.

SHABANGU, T. H.; HAMAM, Y.; ADEDEJI, K. B. Decision support systems for leak control in urban water supply systems: A literature synopsis. **Procedia CIRP**, vol. 90, p. 579–583, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.120>.

SILVA, S. T. B. **Influência das condições de ocupação do solo, da deposição seca e de dispositivos de desvio, sobre a qualidade da água de chuva.** Tese (Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2017.

SILVA, S. T. B., ARAÚJO, L. F., ALMEIDA, A. J. G. A., GAVAZZA, S., SANTOS, S. M. Comportamento de dispositivos de desvio das primeiras águas de chuva como barreiras sanitárias para proteção de cisternas. **Águas Subterrâneas**, 31(2), 1–11. 2017. <https://doi.org/10.14295/ras.v31i2.28658>

SNIS, S. N. I. SOBRE S. Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto. **Ministério do Desenvolvimento Regional Secretaria Nacional de Saneamento - SNS**, p. 56, 2022.

SOUZA, S. H. B.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SANTOS, S. M.; PESSOA, S. G. S. Avaliação da Qualidade da Água e da Eficácia de Barreiras Sanitárias em Sistemas

para Aproveitamento de Águas de Chuva. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, p. 81–93, 2011.

SURIYA, S.; MUDGAL, B. V. Impact of urbanization on flooding: The Thirusoolam sub watershed – A case study. **Journal of Hydrology**, v. 412–413, p. 210–219, 2010.

TINGSANCHALI, T. Urban flood disaster management. **Procedia Engineering**, v. 32, p. 25–37, 2012.

TOMAZ, P. Aproveitamento de Água de Chuva - Para Áreas Urbanas e Fins não Potáveis. **Navegar Editora**, São Paulo, 2003.

TWDB, T. W. D. B. **The Texas Manual on Rainwater Harvesting**. Disponível em: <http://www.twdb.state.tx.us/publications/reports/rainwaterharvesting%0Amanual_3rdedition.pdf>. Acesso em: 29 dez. 2022.

U. N., W. **Water security & the global water agenda: A UN-water analytical brief** **Environment & Health**, Hamilton, Ontario, 2013.

VIDAL, R. T. **Água de Ilúvia, água aludável**. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2010.

WATERFALL, P. . Harvesting rainwater for landcape use. **University of Arizona Cooperative**. 2002.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION; UNICEF – UNITED NATIONS CHILDREN’S FUND. **Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2020: five years into the SDGs**. Geneva: World Health Organization (WHO) and the United Nations Children’s Fund (UNICEF), 2021. Disponível em: <<https://data.unicef.org/resources/progress-on-household-drinking-water-sanitation-and-hygiene-2000-2020/>>. Acessado em: 20 dez. 2022.

XAVIER, R. . **Ocorrência de contaminação por bactérias e por protozoários patogênicos intestinais em águas de consumo nas comunidades rurais do município de Tuparetama - PE**. 2006. Monografia (Graduação em Biomedicina), Universidade Federal de Pernambuco. Recife-PE, 2006.

APÊNDICE A – HISTÓRICO DE PRECIPITAÇÃO E ACUMULADO ANUAL – POSTO VÁRZEA, RECIFE

Ano	Precipitação (mm/mês)												Total acumulado
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maiο	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	
2011	139,1	329,5	122,1	669,5	710,9	303,6	556,2	200,9	35,7	34,6	76,0	43,0	3221,1
2012	197,4	190,6	139,0	56,1	190,3	295,6	260,5	173,3	20,1	53,9	9,9	25,1	1611,8
2013	95,7	43,8	98,6	223,6	317,7	494,7	415,2	224,0	146,0	128,5	76,5	177,1	2441,4
2014	106,3	150,9	251,6	339,4	312,5	319,9	278,4	162,3	250,0	146,5	56,0	71,3	2445,1
2015	64,6	54,0	341,8	74,4	171,0	449,4	445,5	116,6	29,7	16,2	30,6	91,8	1885,6
2016	119,6	70,9	244,3	291,6	478,8	146,7	111,1	58,3	46,6	13,7	16,2	67,8	1665,6
2017	28,7	20,9	139,2	291,7	397,7	487,0	486,2	109,1	83,8	60,0	14,8	30,1	2149,2
2018	153,6	119,8	120,6	466,4	183,1	133,6	94,2	105,5	50,3	21,1	37,4	74,5	1560,1
2019	143,5	111,1	159,9	281,1	205,0	462,8	306,1	183,4	110,0	59,5	3,9	22,2	2048,4
2020	56,2	84,3	166,2	251,1	246,9	329,0	186,9	119,4	62,4	17,4	55,4	62,9	1638,1
Média (mm)	110,47	117,58	178,33	294,48	321,39	342,23	314,03	145,28	83,46	55,14	37,67	66,58	2066,64

APÊNDICE B – VIABILIDADE ECONÔMICA

Os custos utilizados nos cálculos foram obtidos do site da companhia de energia elétrica local (<https://servicos.neoenergiapernambuco.com.br/residencial-rural/Pages/tarifa-de-energia.aspx>) e companhia de abastecimento de água local (<https://lojavirtual.compesa.com.br:8443/gsan/exibirConsultarEstruturaTarifariaPortalAction.do>).

$$E = CAb - (CB + CEE)$$

Onde:

E : R\$ 1.218,29

CAb: $2 \cdot ((\text{Cons.médio} - 10) \cdot \text{Cobrança após } 10 \text{ m}^3 + \text{Cobrança até } 10 \text{ m}^3)$

CAb: R\$ 5.918,55

Cb: $2 \cdot ((\text{Cons.médio} - \text{Volume de chuva chuvoso}) - 10) \cdot \text{Cobrança após } 10 \text{ m}^3 + \text{Cobrança até } 10 \text{ m}^3)$

CB: R\$ 4.620,47

CEE: $(\text{Potb. dias. tempo útil} \cdot \text{valor cobrado pela CEEE}) / 1000$

CEE: R\$ 79,79

E anual = 12 · E

E anual = R\$ 14.619,48