



INSTITUTO FEDERAL DE PERNAMBUCO
CAMPUS IAGARASSU
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA EM SISTEMAS PARA INTERNET

Angelo Fernandes Brandão Oliveira

Aquasense: Um sistema IoT adaptativo para monitoramento de água em ambientes desafiadores

Igarassu

2025

Angelo Fernandes Brandão Oliveira

Aquasense: Um sistema IoT adaptativo para monitoramento de água em ambientes desafiadores

Monografia apresentada à Coordenação de Graduação do Curso de Tecnologia em Sistemas para Internet do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Pernambuco, como requisito para a conclusão do curso.

Área de Concentração: IoT e Desenvolvimento Web

Orientador: Prof. David Junio Mota Cavalcanti

Igarassu

2025

O48a

Oliveira, Angelo Fernandes Brandão.

Aquasense : um sistema IoT adaptativo para monitoramento de água em ambientes desafiadores / Angelo Fernandes Brandão Oliveira ; orientador David Junio Mota Cavalcanti, 2025.

44f. : il.

Orientador: David Junio Mota Cavalcanti.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Federal de Pernambuco. Pró-Reitoria de Ensino. Diretoria de Ensino. Campus Igarassu. Coordenação do Curso Superior de Tecnologia em Sistemas para Internet, 2025.

1. Internet das coisas. 2. Água – Consumo - Software. 3. Software de aplicação - Desenvolvimento. 4. Aplicações Web. I. Título.

CDD 006.22

Andréa Maria Lidington Lins –CRB4/868

Dedico este trabalho à minha tia Fernanda, ao meu pai Fernando, à minha avó Dinha e ao meu tio Alberes, que sempre estiveram ao meu lado, me incentivando e me dando forças para seguir em frente, mesmo nos momentos mais difíceis. Essa conquista também é de vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, David Cavalcanti, pela orientação dedicada, pela confiança no meu trabalho e pela amizade construída ao longo desta jornada. Sua contribuição foi essencial para meu crescimento acadêmico e profissional.

Sou grato também à minha família e aos amigos que sempre estiveram ao meu lado, apoiando minha evolução pessoal e incentivando meus sonhos. Cada palavra de apoio e cada gesto de confiança foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

A todos que, de alguma forma, fizeram parte desta trajetória, o meu muito obrigado.

RESUMO

A crescente escassez de água tem motivado a busca por soluções eficazes para a conservação e gestão dos recursos hídricos, especialmente em regiões onde o acesso à água potável é limitado e irregular. A Internet of Things (IoT) (Internet das Coisas) surge como uma tecnologia promissora nesse cenário, permitindo o desenvolvimento de sistemas inteligentes capazes de monitorar, analisar e melhorar o uso da água. No entanto, a aplicação da IoT em regiões semiáridas enfrenta desafios específicos, como infraestrutura precária, instabilidade no fornecimento de energia e condições ambientais adversas que afetam diretamente a precisão dos sensores e a durabilidade dos dispositivos. As soluções atualmente disponíveis, em sua maioria, são voltadas para contextos urbanos e ambientes de cidades inteligentes, onde os recursos não são limitados e a conectividade é estável. Essas abordagens, além de frequentemente apresentarem altos custos operacionais, não consideram as limitações e incertezas presentes em regiões semiáridas, o que compromete sua eficácia e sustentabilidade nesses contextos. Neste cenário, este trabalho propõe o **Aquasense**, uma solução IoT adaptativa desenvolvida especificamente para o monitoramento do consumo de água em ambientes semiáridos. O sistema utiliza sensores de baixo custo instalados em cisternas domésticas, responsáveis por medir os níveis de água armazenada. Esses dados são enviados para uma aplicação web distribuída que oferece visualizações intuitivas, alertas e previsões de esgotamento, auxiliando os usuários na tomada de decisão quanto ao uso consciente da água. O diferencial do **Aquasense** está na sua capacidade adaptativa: o sistema é projetado para ajustar automaticamente seu comportamento com base nas condições do ambiente e na disponibilidade de recursos, como energia da bateria. Essa adaptabilidade permite otimizar o consumo energético, prolongar a vida útil dos dispositivos e garantir a confiabilidade das medições mesmo diante de dificuldades operacionais. Com isso, o **Aquasense** se posiciona como uma alternativa viável, de baixo custo e impacto positivo para a gestão eficiente dos recursos hídricos em regiões desafiadoras.

Palavras-chaves: Internet das Coisas. Sistemas Adaptativos. Smart Water. Aplicações Web.

ABSTRACT

The growing water scarcity has driven the search for effective solutions for the conservation and management of water resources, especially in regions where access to potable water is limited and irregular. IoT (Internet of Things) emerges as a promising technology in this scenario, enabling the development of intelligent systems capable of monitoring, analyzing, and improving water usage. However, the application of IoT in semi-arid regions faces specific challenges, such as poor infrastructure, unstable power supply, and harsh environmental conditions that directly affect sensor accuracy and device durability. Most of the solutions currently available are designed for urban contexts and smart city environments, where resources are not limited and connectivity is stable. These approaches often involve high operational costs and do not account for the limitations and uncertainties present in semi-arid regions, compromising their effectiveness and sustainability in these contexts. In this scenario, this work proposes **Aquasense**, an adaptive IoT solution specifically developed for monitoring water consumption in semi-arid environments. The system uses low-cost sensors installed in household cisterns to measure the levels of stored water. This data is transmitted to a distributed web application that provides intuitive visualizations, alerts, and depletion forecasts, helping users make informed decisions about conscious water use. What sets **Aquasense** apart is its adaptive capability: the system is designed to automatically adjust its behavior based on environmental conditions and resource availability, such as battery power. This adaptability allows for energy consumption optimization, prolonged device lifespan, and reliable measurements even in the face of operational difficulties. As such, **Aquasense** stands out as a viable, low-cost, and impactful alternative for the efficient management of water resources in challenging regions.

Keywords: Internet of Things. Adaptive Systems. Smart Water. Web Applications.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Visão geral do Aquasense	24
Figura 2 – Cliente Aquasense	26
Figura 3 – Dispositivo IoT	28
Figura 4 – Visão Geral do Serviço Aquasense	29
Figura 5 – Visão Geral do Módulo Core	30
Figura 6 – Interface web do Aquasense	30
Figura 7 – Visão do Sistema Gerenciador	32
Figura 8 – Modelagem de Banco de Dados do Aquasense	34
Figura 9 – Tempo de vida de uma bateria de 3000 mAh nos dois cenários	38
Figura 10 – Trocas de bateria com e sem adaptação	39

LISTA DE CÓDIGOS

Código Fonte 1 – Funções de medição	27
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Motor de Regras do Aquasense para Monitoramento de Nível da Cisterna . 32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IoT	Internet of Things
MAPE-K	Monitor-Analyser-Planner-Executor + Knowledge
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	CONTEXTO E MOTIVAÇÃO	12
1.2	O PROBLEMA	13
1.3	OBJETIVOS	14
1.4	ORGANIZAÇÃO	14
2	CONCEITOS BÁSICOS E TRABALHOS RELACIONADOS	15
2.1	CONCEITOS BÁSICOS	15
2.1.1	Internet das Coisas	15
2.1.1.1	<i>Heterogeneidade Tecnológica</i>	16
2.1.1.2	<i>Limitação de Recursos</i>	16
2.1.1.3	<i>Distribuição e dinamismo</i>	17
2.1.1.4	<i>Incertezas</i>	17
2.2	MQTT	18
2.3	SMART WATER	19
2.4	SISTEMAS ADAPTATIVOS	20
2.5	TRABALHOS RELACIONADOS	21
3	AQUASENSE	23
3.1	VISÃO GERAL	23
3.1.1	Cliente Aquasense	25
3.1.2	Protocolo de Comunicação	28
3.1.3	Serviço Aquasense	29
3.1.4	Sistema Gerenciador	31
3.1.5	Implementação	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1	VISÃO GERAL	35
4.2	AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL	36
4.2.1	Cenário do Experimento	36
4.2.2	Métrica, Parâmetros e Fatores	37
4.2.3	Avaliação do Impacto da Adaptação na Vida Útil da Bateria	37
5	CONCLUSÕES	40

5.1	CONCLUSÃO	40
5.2	LIMITAÇÕES	41
5.3	TRABALHOS FUTUROS	41
5.4	PUBLICAÇÕES	42
	REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

Esse capítulo introduz o trabalho de conclusão de curso. Primeiro, ela apresenta o contexto e a motivação do trabalho. Em seguida, identifica o problema de pesquisa. Depois, apresenta os objetivos do trabalho, destacando a solução proposta. Por fim, é apresentada a estrutura do documento.

1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO

A escassez de água, impulsionada pelo rápido crescimento populacional e pelo aumento da demanda, foi novamente identificada como um dos principais riscos globais pelo Fórum Econômico Mundial (GETIRANA; LIBONATI; CATALDI, 2021). Projeções indicam um aumento de 24% no consumo de água doce até 2030 (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil), 2024), por isso, as preocupações com a escassez de água estão crescendo, e sua gestão se tornou um desafio¹. Essa crise hídrica é complexa, abrangendo aspectos ecológicos, econômicos e sociais. O crescimento urbano e a expansão agrícola intensificam a competição pela água, resultando em conflitos setoriais e comunitários. As mudanças climáticas agravam essa situação, alterando os padrões de precipitação e aumentando a frequência e severidade de secas e enchentes²

Em regiões semiáridas, como o Nordeste do Brasil, a variabilidade das chuvas e as secas prolongadas impactam diretamente o suprimento de água, tornando essencial a gestão eficiente e o controle inteligente do consumo (GONDIM et al., 2017). Nesse contexto, a busca por soluções eficazes para o controle e a conservação de água é uma prioridade. Isso inclui sistemas de monitoramento e alertas, políticas públicas de conservação e reutilização de águas residuais, com o objetivo de garantir a sustentabilidade dos recursos hídricos (BRITO; LOPES; NETA, 2019).

Uma alternativa para enfrentar esses desafios é desenvolver soluções tecnológicas inteligentes de gestão de água, capazes de medir o consumo, detectar vazamentos invisíveis e prevenir desperdícios. A evolução IoT estimulou o desenvolvimento de muitos desses sistemas (SINGH; AHMED, 2020; HAN; MEHROTRA; VENKATASUBRAMANIAN, 2019). Por exemplo, Liu e Mukheibir (LIU; MUKHEIBIR, 2018) mostram que a implementação de sistemas de monitoramento de água com feedback automático pode reduzir o consumo entre 4,2% e 8,5%.

¹ Disponível em: <<https://www.unwater.org/water-facts/water-scarcity>>.

² Disponível em: <<https://www.un.org/pt/climatechange/science/causes-effects-climate-change>>.

1.2 O PROBLEMA

No Brasil, particularmente na região Nordeste, a escassez de água é intensificada pela variabilidade das chuvas e extensas áreas semiáridas. Além disso, a demanda por consumo doméstico é a principal necessidade de água nessa região. Esses fatos tornam a conservação da água crítica, especialmente em regiões remotas, economicamente pobres e com recursos limitados (GONDIM et al., 2017). Soluções tradicionais, como cisternas, são amplamente utilizadas para coletar água da chuva em períodos de seca e enfrentar os desafios da escassez hídrica. Um exemplo é a “Associação Programa Um Milhão de Cisternas” (AP1MC)³, programa do governo que constrói cisternas nessas regiões para captar água da chuva e fornecer água potável durante períodos de seca. Cada cisterna pode armazenar 16 m³ de água, suficientes para sustentar uma família de quatro pessoas por até cinco meses, atendendo à necessidade mínima diária por pessoa definida pela Organização Mundial da Saúde (OMS) (RODRIGUEZ; PRUSKI; SINGH, 2016; FRANÇA et al., 2010). No entanto, gerenciar o uso dessa água exige soluções avançadas.

Nesse contexto, necessidade crítica de uso e gerenciamento racional da água pode ser atendida por meio de sistemas IoT, que contribuem para melhorar a infraestrutura e conservação da água. No entanto, a implementação de sistemas IoT em ambientes desafiadores, como em regiões semiáridas, enfrenta dificuldades significativas devido às condições adversas do ambiente. Essas condições introduzem incertezas na precisão dos sensores, na vida útil da bateria e na manutenção dos sistemas. Lidar com essas incertezas é essencial para a operação eficaz do sistema. A maioria dos sistemas IoT são projetados para operar em cidades inteligentes onde robustez e resiliência não são normalmente as principais preocupações (KANT; JOLFAEI; MOESSNER, 2024). Por outro lado, há um crescente interesse em implantar sistemas de IoT em ambientes desafiadores, como as regiões semiáridas, onde os sistemas IoT exigem um design robusto para enfrentar condições dinâmicas, incluindo infraestrutura envelhecida, capacidade limitada e mudanças climáticas que afetam a confiabilidade do sensor, o gerenciamento de energia e a durabilidade do sistema.

³ Available in <<https://www.asabrazil.org.br/acoes/p1mc>>.

1.3 OBJETIVOS

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo propor o desenvolvimento do **Aquasense**, um sistema IoT adaptativo voltado ao monitoramento e gerenciamento do consumo de água em regiões semiáridas, com foco em auxiliar os usuários na conservação dos recursos hídricos. O sistema combina uma pilha de software distribuída com um dispositivo IoT de baixo custo, integrando uma aplicação embarcada para medição dos níveis de água em cisternas domésticas e uma aplicação web para fornecer feedback digital sobre o uso da água.

O **Aquasense** se diferencia das soluções existentes por meio da adoção de conceitos de sistemas adaptativos, capazes de lidar com incertezas, responder a mudanças dinâmicas e atender às demandas da aplicação. O objetivo é garantir o funcionamento adequado em ambientes desafiadores, ao mesmo tempo em que minimiza os custos de implantação e manutenção. Embora o sistema seja facilmente customizável, a versão atual foca na incorporação de um mecanismo adaptativo paramétrico voltado à conservação de energia dos dispositivos IoT.

A avaliação do **Aquasense** usa uma abordagem analítica, com análise do código-fonte, realização de testes funcionais em um dispositivo real e visa avaliar o impacto da adaptação no consumo da bateria.

1.4 ORGANIZAÇÃO

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma: Seção 2 apresenta os conceitos fundamentais necessários para a compreensão da solução proposta. Na sequência, a Seção 3 apresenta o **Aquasense**, com uma descrição detalhada de sua arquitetura e implementação. Posteriormente, a Seção 4 demonstra os resultados do experimento realizado para avaliar o desempenho e a eficiência energética do **Aquasense**, incluindo uma análise comparativa entre os cenários com e sem adaptação do sistema, destacando o impacto na autonomia da bateria e no consumo de energia. Finalmente, a Seção 5 conclui o projeto e apresenta as limitações e os potenciais aprimoramentos para trabalhos futuros.

2 CONCEITOS BÁSICOS E TRABALHOS RELACIONADOS

Este capítulo apresenta os conceitos básicos necessários para compreender a solução proposta e os trabalhos relacionados com a solução.

2.1 CONCEITOS BÁSICOS

Nesta seção, são apresentados os conceitos básicos. Inicialmente, é apresentado o conceito de Internet das Coisas. Em seguida, são introduzidos os conceitos de microcontroladores e do protocolo de comunicação Message Queuing Telemetry Transport (MQTT). O capítulo é concluído com uma introdução ao conceito de Smart Water, seguida de uma breve discussão sobre sistemas adaptativos.

2.1.1 Internet das Coisas

IoT, é uma tecnologia que permite o desenvolvimento de aplicações de software a partir de uma rede de dispositivos inteligentes, como veículos, sensores, atuadores, dispositivos virtuais, dentre outros. Esses dispositivos podem operar de forma coletiva pela Internet e se comunicar entre si para fornecer serviços e alcançar objetivos comuns (CAVALCANTI; HUGHES; ROSA, 2023; ATZORI; IERA; MORABITO, 2010).

A IoT tem recebido grande atenção da academia e da indústria devido ao seu potencial para melhorar diversos aspectos da sociedade e interagir com as pessoas, aumentando, assim, a eficiência da infraestrutura e a qualidade de vida. Os avanços em IoT possibilitaram o desenvolvimento de casas inteligentes (AGOSTINHO et al., 2018), cidades inteligentes (COSTA et al., 2022), saúde digital (eHealth) (MUKHOPADHYAY; SREENADH; ANOOP, 2020), gestão inteligente da água (SINGH; AHMED, 2020) e Internet das Coisas Industrial (IIoT) (SISINNI et al., 2018).

No entanto, as características dos ambientes IoT, como a diversidade de aplicações, dispositivos heterogêneos e tecnologias de comunicação variadas, além das limitações de recursos, geram desafios como a interoperabilidade limitada, escassez de recursos e incertezas nesses ambientes.

2.1.1.1 *Heterogeneidade Tecnológica*

Um das principais características da IoT é a heterogeneidade. As aplicações IoT interconectam diversos elementos heterogêneos, como smartphones, sensores, veículos e serviços virtuais, incluindo sistemas de software. Além disso, aplicações IoT utilizam uma combinação de diversas tecnologias, como identificação, comunicação, computação e gerenciamento de dados, para coletar, processar e trocar informações com objetivos comuns.

Assim, um ambiente IoT pode incluir vários tipos de dispositivos na mesma aplicação, como sensores de monitoramento ambiental (por exemplo, detectores de incêndio) em uma aplicação de automação predial, além de atuadores que acionam os bombeiros e ativam o alarme em caso de incêndio. Da mesma forma, um único sensor pode atender a várias aplicações, como monitoramento de tráfego, economia de energia e fornecimento de água.

Além disso, diversas aplicações estão cada vez mais interconectadas em uma rede IoT complexa e integrada, composta subsistemas interligados pela Internet e sujeitos a mudanças e ao processamento dinâmico de dados.

2.1.1.2 *Limitação de Recursos*

Embora aplicações IoT possam, eventualmente, exigir maior capacidade computacional para roteamento, comutação e processamento de dados, a maioria dos dispositivos IoT são pequenos e embarcados. Devido à sua natureza sensorial e computacional, muitos dispositivos utilizam plataformas de baixo custo, as quais possuem limitações de processamento, memória e capacidade de comunicação.

É essencial considerar essas limitações ao desenvolver aplicações IoT. Contudo, quando determinadas aplicações exigem maior capacidade de processamento, conectividade diversificada ou maior autonomia de bateria, componentes complementares, como gateways IoT e sistemas de middleware, podem ser utilizados para atender a essas necessidades. Esses elementos adicionais facilitam funções como processamento e transmissão de dados via *edge computing*, ou a tradução de comunicação entre diferentes protocolos e tecnologias.

2.1.1.3 *Distribuição e dinamismo*

Assim como a Internet tradicional, a IoT apresenta características de distribuição. Aplicações IoT são construídas por dispositivos móveis interconectados de forma sem fio, todos operando sob restrições de recursos. Além disso, a IoT introduz uma camada adicional de complexidade devido ao seu dinamismo intrínseco.

Por exemplo, dispositivos na rede podem entrar ou sair a qualquer momento, além de poderem se desconectar devido a fatores como redes sem fio instáveis ou baixa carga de bateria. Ambientes com acesso limitado ou inexistente a infraestruturas fixas dificultam a manutenção de uma rede estável que suporte múltiplas aplicações IoT. Consequentemente, a IoT exige mecanismos que facilitem a cooperação entre dispositivos para manter a rede ativa.

2.1.1.4 *Incertezas*

Outra característica importante das aplicações IoT é a incerteza. Em geral, a incerteza refere-se a qualquer evento inesperado, desvio, mudança ou erro que ocorra de forma imprevista em um sistema, dificultando a previsão de seu comportamento. A incerteza se manifesta quando os resultados de atividades em andamento não podem ser determinados com total certeza. Nesse sentido, a incerteza está relacionada a mudanças difíceis de estimar ou a eventos cuja probabilidade não pode ser prevista devido à limitação das informações disponíveis.

Devido à sua complexidade, alto dinamismo, limitações de recursos e integração com outras aplicações, os sistemas IoT são especialmente suscetíveis a diversas fontes de incerteza. As aplicações IoT estão sujeitas a diferentes tipos de dinamismo que podem surgir em várias camadas da pilha tecnológica da IoT durante sua operação. Lidar com a gestão dessas incertezas é um desafio significativo no projeto e na implementação de soluções IoT.

As camadas padrão das aplicações IoT incluem: Aplicações, Plataformas, Comunicação e Dispositivos. Cada uma dessas camadas pode conter elementos como sensores e atuadores, unidades de armazenamento e processamento de dados, servidores de computação e tecnologias de comunicação, que representam fontes de incerteza. Por exemplo, a heterogeneidade dos dispositivos pode resultar em diferentes capacidades de processamento e suporte a protocolos de comunicação distintos (como Wi-Fi e Bluetooth), introduzindo incertezas por erros de medição, variações ambientais, perda de pacotes na rede e falhas de dispositivos.

Considere uma aplicação IoT que monitora níveis de água em um reservatório por meio

de uma rede de sensores. Cada sensor pode transmitir dados diretamente ao gateway IoT, caso esteja dentro do alcance. Caso contrário, os dados podem ser repassados por outros sensores até alcançar o gateway. Nesse cenário, a aplicação exige comunicação confiável, baixa latência, baixo consumo de energia e um caminho eficiente para o encaminhamento dos pacotes. Garantir a qualidade da comunicação é desafiador, pois a aplicação é suscetível a diversas incertezas.

Duas principais fontes de incerteza incluem: (1) interferências na rede, como condições climáticas e a presença de sinais sem fio (como Wi-Fi) nas proximidades, que podem causar perda de pacotes; (2) variação na carga de tráfego, onde o número de pacotes gerados pelos sensores pode oscilar devido à frequência de amostragem e possíveis congestionamentos na rede. Mecanismos adaptativos podem ajudar a resolver esses desafios, reconfigurando dinamicamente a distribuição de pacotes ao longo dos enlaces dos sensores com base na carga de tráfego.

Por fim, como as aplicações IoT precisam funcionar por longos períodos e muitos dispositivos são alimentados por bateria, o consumo de energia também é uma incerteza crítica. Aplicações IoT operam em ambientes imprevisíveis, e a troca de baterias pode ser cara ou até inviável. Assim, minimizar o consumo de energia para maximizar a vida útil dos dispositivos é essencial.

Além disso, as próprias aplicações podem sofrer modificações ao longo do tempo, afetando a configuração das camadas subjacentes e gerando incertezas tanto no estado da aplicação quanto no ambiente. Quando sistemas diversos se comunicam, uma incerteza originada em um sistema pode afetar negativamente outros sistemas interconectados. Portanto, a capacidade de (re)configurar dinamicamente a aplicação em tempo de execução para lidar com essas incertezas é uma característica crucial.

Essas características tornam o desenvolvimento de aplicações IoT mais complexo, principalmente em ambientes desafiadores, como os semiáridos, que enfrentam condições adversas e inesperadas. Isso ocorre devido as condições de infraestrutura envelhecida, capacidade excedida e condições operacionais adversas provocadas pelas mudanças climáticas.

2.2 MQTT

O *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) é um protocolo leve e de código aberto, projetado para ambientes com recursos limitados, como é o caso dos ambientes IoT. Ele foi

desenvolvido para permitir a troca eficiente de mensagens entre dispositivos e tem sido amplamente adotado como protocolo padrão para implementar sistemas de middleware *publisher/-subscriber* em ambientes IoT.

Como observado, o MQTT segue o modelo de comunicação *publisher/subscriber*, no qual permite que aplicações, atuando como publicadores (publishers), publiquem mensagens em tópicos específicos, sem especificar explicitamente os destinatários ou conhecer quem os receberá. Outras aplicações, atuando como assinantes (subscribers), se inscrevem para receber essas mensagens e processá-las conforme o tópico de interesse. Essa abordagem elimina a necessidade de conexões diretas, otimizando recursos e permitindo a comunicação simultânea entre milhares de dispositivos.

Além disso, o protocolo inclui um broker, que é um elemento intermediário responsável por gerenciar as mensagens. Ele recebe as mensagens publicadas pelos publicadores e as encaminha para os assinantes. Quando um publicador envia uma mensagem, o broker a distribui para todos os assinantes interessados no tópico correspondente, garantindo a troca eficiente de informações e promovendo maior escalabilidade e eficiência na comunicação.

Essa arquitetura oferece diversas características importantes para a comunicação em ambientes IoT, como a eliminação da necessidade de conexões diretas entre os dispositivos. Além disso, permite que múltiplos usuários acessem os mesmos recursos simultaneamente, sem conflitos, e de forma transparente, sem que precisem saber detalhes sobre a localização ou representação dos dados. Mesmo que o recurso esteja remoto, ele parece local para o usuário. Por fim, padroniza a tecnologia subjacente, escondendo diferenças entre sistemas operacionais, linguagens de programação, plataformas e tecnologias de comunicação.

2.3 SMART WATER

Smart Water é uma das abordagens de IoT que definem uma cidade inteligente. Geralmente, refere-se a soluções inteligentes que aprimoram a infraestrutura hídrica com ferramentas habilitadas pela internet para gerenciar esse recurso natural. O objetivo é tornar a cidade mais sustentável e eficiente com soluções que lidam com o monitoramento da água, sua fonte, tratamento e distribuição. Essas soluções otimizam o monitoramento, o abastecimento, o tratamento e a entrega da água. A evolução da IoT impulsionou o desenvolvimento de muitos desses sistemas, que se destacam no abastecimento, tratamento e entrega (HAN; MEHROTRA; VENKATASUBRAMANIAN, 2019; SINGH; AHMED, 2020).

Como exemplos, existem soluções de *Smart Water* para monitoramento da qualidade da água (por exemplo, pH, temperatura e sólidos dissolvidos totais) e monitoramento do nível da água (por exemplo, monitoramento do nível da água em tempo real). Essas soluções coletam dados em tempo real, esses dados são processados e analisados automaticamente, permitindo a identificação de anomalias e a tomada de decisões rápidas e eficazes para mitigar problemas. Além disso, tais sistemas podem prever padrões de demanda, contribuindo para uma distribuição de água mais eficiente e sustentável.

A tecnologia *Smart Water* é especialmente relevante em ambientes urbanos, onde a gestão eficaz dos recursos hídricos é um desafio crescente devido ao aumento populacional e às mudanças climáticas. Cidades inteligentes adotam essas soluções para monitorar e otimizar o uso da água, melhorando a eficiência das redes de distribuição, reduzindo o desperdício e garantindo maior segurança no fornecimento de água potável.

Um sistema *Smart Water* é composto por dispositivos de coleta de dados (sensores de pressão, fluxo, qualidade da água), sistemas de comunicação (redes LoRaWAN, Wi-Fi ou 4G) e plataformas de software para processamento e análise dos dados. Por meio desses componentes, é possível monitorar todo o ciclo da água, desde a captação até o consumo, promovendo uma gestão mais sustentável dos recursos hídricos.

2.4 SISTEMAS ADAPTATIVOS

Sistemas adaptativos são capazes de ajustar seu comportamento e estrutura em resposta a alterações internas ou externas no ambiente, permitindo que evoluam suas funcionalidades e até mesmo corrijam erros durante a execução. Segundo Weyns et al. (WEYNS; RAMACHANDRAN; SINGH, 2018), um sistema adaptativo é composto por duas partes principais: o sistema gerenciado e o sistema de gerenciamento. O sistema gerenciado é responsável por interagir com o ambiente e executar as funcionalidades da aplicação, enquanto o sistema de gerenciamento supervisiona o sistema gerenciado por meio de um loop de feedback, monitorando o ambiente e ativando as adaptações necessárias para que os objetivos do sistema sejam atingidos, mesmo diante de condições variáveis.

Para que um sistema seja considerado autoadaptativo, ele deve cumprir dois princípios básicos: o princípio externo e o princípio interno. O princípio externo estabelece que o sistema deve ser capaz de alcançar seus objetivos mesmo diante de mudanças e incertezas, com pouca ou nenhuma intervenção humana. Em sistemas tradicionais, essas incertezas são gerenciadas

por operadores humanos; já em sistemas autoadaptativos, elas são tratadas de forma autônoma, a partir de metas de adaptação previamente definidas. O princípio interno, por sua vez, reforça a separação entre o sistema gerenciado, que lida com as preocupações de domínio, e o sistema de gerenciamento, que se encarrega das adaptações, ou seja, das preocupações sobre essas preocupações de domínio.

Como mencionado, o no desenvolvimento de sistemas adaptativos, um dos mecanismos fundamentais é o loop de feedback. E o loop mais frequentemente utilizado é o Monitor-Analyser-Planner-Executor + Knowledge (MAPE-K) (COMPUTING et al., 2006). Nele, o Monitor coleta dados do sistema gerenciado e do ambiente, o Analisador identifica a necessidade de adaptações, o Planejador elabora um plano de ação e o Executor implementa as mudanças necessárias.

Em aplicações de IoT, a adaptação é crucial para o gerenciamento contínuo e eficiente de sistemas, reduzindo a necessidade de intervenção humana e possibilitando a manutenção autônoma durante a execução. Isso é essencial para lidar com as incertezas e variabilidades características das aplicações de IoT.

2.5 TRABALHOS RELACIONADOS

A utilização de sistemas IoT para gestão da água não é recente. Esses sistemas têm sido aplicados para diversas finalidades, como monitoramento do consumo e detecção de qualidade da água, prevenção e alerta de acidentes e desastres.

Em relação à qualidade da água, soluções monitoram aspectos como pH, condutividade, níveis de oxigênio e total de sólidos dissolvidos, ganhando destaque nas cidades inteligentes por ajudar a determinar se a água é segura para consumo e identificar potenciais fontes de contaminação (II et al., 2023) (LAKSHMIKANTHA et al., 2021). Atualmente, o **Aquasense** concentra-se no monitoramento do consumo de água, não abrangendo a sua qualidade.

As soluções atuais de monitoramento do nível de água geralmente são projetadas para analisar o consumo de água, detectar vazamentos e monitorar os níveis de água em locais remotos (MALCHE; MAHESHWARY, 2017) e podem reduzir o consumo em até 8,5% com o feedback automático (LIU; MUKHEIBIR, 2018). Embora estas soluções compartilhem a mesma ideia de monitoramento do nível da água que o **Aquasense**, elas não consideram os desafios de ambientes adversos, como o envelhecimento das infraestruturas, inadequações e limitações de recursos. Essas soluções assumem um ambiente ideal e não buscam resolver os problemas

de incerteza, o que pode comprometer sua funcionalidade. Por exemplo, o trabalho de Kumar(KUMAR et al., 2019) aborda preocupações sobre o consumo eficiente de água e propõe o sistema Smart Microgrid, uma solução para detecção de vazamentos em tanques usando dimensões de tanques e dados de sensores. A solução compreende dois dispositivos: um dispositivo de nível inteligente que mede a altura do tanque de água e carrega dados em tempo real para a nuvem e outro que controla automaticamente o motor do tanque da casa com base nos níveis do tanque. Além disso, inclui uma aplicação híbrida para monitoramento, controle, verificação de vazamentos e análise de dados para garantir o uso eficiente da água. Um aplicativo controla o motor doméstico e identifica o tamanho do vazamento em cada caixa d'água. Porém, os autores parecem considerar um ambiente ideal para a solução sem abordar efeitos adversos como alterações ambientais e de recursos do dispositivo, consumo de energia ou quaisquer outras características que possam dificultar o seu funcionamento.

A pesquisa de Hassan(HASSAN et al., 2020) destaca a importância das medidas preventivas em relação às inundações e propõe uma solução de monitoramento e alerta para mitigar os problemas decorrentes dessas inundações usando a Malásia como local de estudo. A solução é composta por um controlador que utiliza dois sensores para coletar dados e posteriormente analisar, um sensor ultrassônico e um sensor de temperatura e umidade, essas informações são processadas com base nas condições de risco como normal, alerta, aviso e perigo e são enviadas ao Sistema Global para Comunicações Móveis¹ e possivelmente propagadas para celulares de usuários-chave, como centros policiais e órgãos responsáveis.

Em comparação com essas soluções de monitoramento de água, o **Aquasense** se diferencia ao focar na adaptação e no gerenciamento de incertezas operacionais em ambientes desafiadores, abordando diretamente os problemas que outras soluções não consideram.

¹ <https://apdsi.pt/glossario/s/sistema-gsm/>

3 AQUASENSE

Esse capítulo apresenta a solução **Aquasense** proposta neste trabalho. Inicialmente é apresentado uma visão geral do **Aquasense** seguida pela descrição da arquitetura. Em seguida os componentes do **Aquasense** apresentados, juntamente com alguns detalhes da sua implementação.

3.1 VISÃO GERAL

O **Aquasense**¹ é um sistema IoT adaptativo projeto especificamente para o monitoramento do consumo de água, com foco em auxiliar os usuários na conservação desse recurso.

Embora o **Aquasense** possa ser customizado para diferentes ambiente, ele é principalmente projetado para cisternas de água em regiões semiáridas. O sistema combina uma pilha de software distribuída com um dispositivo IoT de baixo custo. A pilha inclui uma aplicação web para fornecer feedback digital sobre o uso da água e previsões de esgotamento, além de uma aplicação IoT embarcada, executada em dispositivos IoT, responsável pela medição e coleta de dados sobre a água. Ambas as aplicações são construídas sobre um middleware implementado usando o protocolo de comunicação MQTT.

Durante o desenvolvimento do **Aquasense**, foi necessário o uso de um dispositivo de IoT dedicado para coletar e transmitir dados de consumo de água. O dispositivo é equipado com sensores para medir o uso de água, sendo adotado o dispositivo proposto por David et al.

A diferença essencial do **Aquasense** em relação às soluções existentes está no uso de conceitos de sistemas adaptativos, capazes de lidar com incertezas, responder a mudanças dinâmicas e atender às demandas da aplicação. O objetivo é garantir o funcionamento adequado em regiões semiáridas, que apresentam ambientes adversos com infraestrutura precária, altas temperaturas e localização distante do centros urbanos, minimizando os custos de implantação e manutenção. Atualmente, a adaptação está voltada para a conservação de energia dos dispositivos IoT.

A Figura 1 apresenta a visão geral do **Aquasense**, incluindo o Cliente **Aquasense**, o Serviço **Aquasense**.

¹ <https://github.com/Fernandez/water-control>

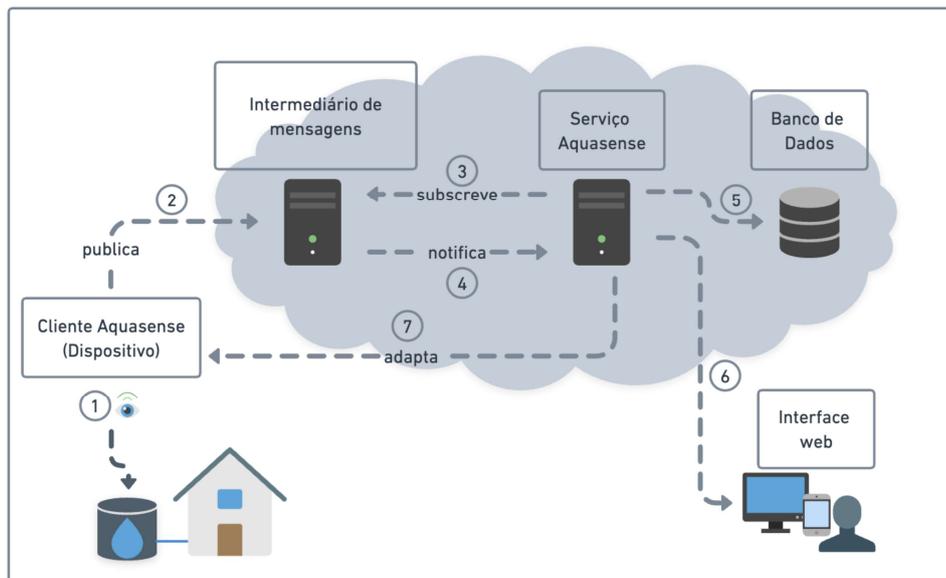


Figura 1 – Visão geral do **Aquasense**

O Cliente **Aquasense** é a aplicação embarcada executada diretamente no dispositivo IoT, cuja função principal é medir periodicamente o nível de água em uma cisterna residencial, usando um sensor (1). Após coletar esses dados, o Cliente **Aquasense** os publica em um tópico específico associado ao dispositivo no *Broker* na nuvem, usando o middleware MQTT (2). O *Broker* é o serviço de mensagens responsável por gerenciar os tópicos, as mensagens e as aplicações que se inscrevem nesses tópicos para recebê-las.

O Serviço **Aquasense**, hospedado na nuvem, é responsável por processar os dados recebidos dos sensores. Também utilizando o middleware, ele se inscreve nos tópicos gerenciados pelo *Broker Service* (3). Quando novos dados são publicados, o *Broker* notifica o Serviço **Aquasense** (4). Este então processa os dados recebidos de acordo com as regras de negócio implementadas, armazena as informações em um *Banco de Dados* (5) e as disponibiliza para a *Interface Web* por meio de uma API (6). A *Interface Web* exibe o feedback digital sobre o uso da água, contribuindo para o engajamento dos usuários e promovendo mudanças de comportamento com base em atualizações diárias do consumo.

Além disso, o Serviço **Aquasense** implementa a lógica de adaptação (7), responsável por orquestrar as adaptações quando necessário. Essa lógica é baseada no ciclo de adaptação MAPE-K (COMPUTING et al., 2006), amplamente utilizado para implementar sistemas adaptativos. O *Monitor* é responsável por monitorar os dados do sistema, que podem ser utilizados no processo de adaptação, como o nível de água e o horário de monitoramento. O *Analizador* avalia esses dados e aplica regras para decidir se uma adaptação é necessária. Por exemplo,

se a cisterna estiver com 90% de sua capacidade, a frequência de monitoramento pode ser reduzida para uma vez por hora, pois a cisterna está praticamente cheia. Por outro lado, se a cisterna estiver com apenas 20% de sua capacidade, pode ser necessário aumentar a frequência de monitoramento para garantir que a água não se esgote. Caso uma adaptação seja necessária, essa decisão é enviada ao *Planejador*, que é responsável por construir um plano de adaptação. Esse plano de adaptação é o conjunto de ações, definindo, por exemplo, quais parâmetros devem ser ajustados e quais novos valores devem ser aplicados (como frequência de monitoramento = 60 minutos). O *Planejador* então envia esse plano ao *Executor*, que realiza a adaptação no Cliente **Aquasense** executando diretamente no dispositivo IoT.

É importante destacar que a adaptação da frequência de monitoramento significa, na prática, modificar o tempo de inatividade do dispositivo por meio de ajustes nos parâmetros do próprio dispositivo. A frequência de monitoramento de 60 minutos, por exemplo, indica que o dispositivo ficará inativo durante esse período, entrando em modo de baixo consumo (*deep sleep*) até realizar novamente o monitoramento. Dessa forma, o consumo de bateria durante o modo de inatividade é significativamente reduzido, prolongando a vida útil do dispositivo. Como os dispositivos IoT são alimentados por bateria, e a duração da bateria é uma das incertezas mais críticas, preservá-la em ambientes desafiadores é essencial.

As seções a seguir detalham o **Aquasense**.

3.1.1 Cliente Aquasense

Figura 2 apresenta o Cliente **Aquasense**. O Cliente **Aquasense** é a aplicação IoT executada dentro dos dispositivos e responsável por medir o nível de água em cisternas e monitorar o fornecimento de energia atual do dispositivo.

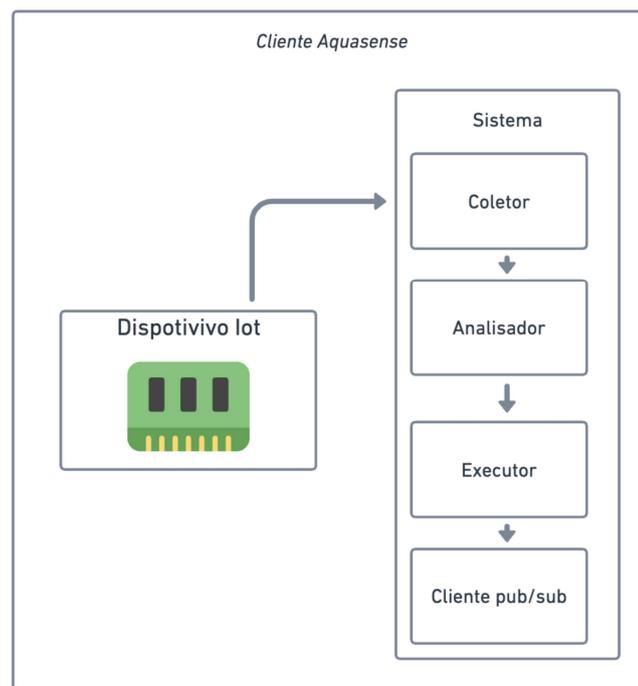


Figura 2 – Cliente **Aquasense**

Como pode ser observado, o Cliente **Aquasense** é composto de três módulos: *Coletor*, *Executor* e Módulo MQTT. O *Coletor* é o módulo que implementa as funcionalidades do sensor para medir o nível de água na cisterna e a voltagem atual de alimentação do dispositivo IoT. O software foi implementado utilizando linguagem Arduino juntamente com algumas bibliotecas nativas para direcionar o funcionamento do microcontrolador e sensor. O Código Fonte 1 apresenta as funções *readDistanceSensor()* e *readVoltageSensor()*, responsáveis por medir o nível de água no reservatório e a voltagem atual de alimentação do dispositivo, respectivamente.

A função *readDistanceSensor()* (Linhas 1-9) é responsável por medir a distância (Linha 7) utilizando um sensor ultrassônico. Esse sensor opera com um transdutor que emite e recebe pulsos ultrassônicos, os quais percorrem o espaço entre o topo da cisterna e o nível de água. Com base no tempo de resposta do eco (Linha 7), o módulo calcula a distância até a superfície da água, permitindo estimar o volume atual armazenado, considerando o formato da cisterna. Já a função *readVoltageSensor()* (Linhas 11-14) tem como objetivo medir a tensão de alimentação do dispositivo (Linha 12) por meio de uma entrada analógica. Essa leitura é usada para calcular o percentual de carga restante da bateria.

Para comunicação entre os componentes Cliente **Aquasense** e Serviço **Aquasense**, é utilizado o protocolo de mensagens MQTT. Após coletar os dados do nível de água, o Cliente

Código Fonte 1 – Funções de medição

```
1 float readDistanceSensor() {  
    digitalWrite(TrigPin, LOW);  
3    delayMicroseconds(2);  
    digitalWrite(TrigPin, HIGH);  
5    delayMicroseconds(10);  
  
7    float durationindigit = pulseIn(EchoPin, HIGH);  
    return (durationindigit / 2) / 29.1;  
9 }  
  
11 float readVoltageSensor() {  
    int nVoltageRaw = analogRead(A0);  
13    return nVoltageRaw;  
}
```

Aquasense utiliza um módulo externo que implementa o protocolo MQTT, por meio da biblioteca PubSubClient², para publicar mensagens contendo esses dados em um *Broker*, que atua como intermediário responsável pela distribuição das mensagens entre as aplicações. Esse modelo de comunicação garante interoperabilidade e adaptabilidade entre diferentes dispositivos e aplicações. Em seguida, o *Broker* encaminha a mensagem para o Serviço **Aquasense**, que a recebe, processa, armazena os dados e os disponibiliza aos usuários por meio de uma interface web.

O módulo *Executor* é responsável de realizar adaptações diretamente no dispositivo, conforme solicitado pelo Serviço **Aquasense**. No que diz respeito à adaptabilidade, ele permite (re)configuração de parâmetros de execução sem a necessidade de interromper ou recompilar a aplicação. Ela permite personalizar parâmetros, que permite ao **Aquasense** responder dinamicamente a mudanças contextuais, otimizando seu funcionamento com base em condições ambientais ou comportamentos específicos do contexto. A adaptação de parâmetros contribuem para que o **Aquasense** mantenha sua operação de forma eficiente, conservando energia mesmo em ambientes remotos e desafiadores. O processo de adaptação será detalhado na Seção 3.1.4.

Finalmente, é importante mencionar que o o dispositivo IoT utilizado para implementar o Cliente **Aquasense** foi proposto por Cavalcanti e Rosa (CAVALCANTI; ROSA, 2024) e é composto por um sensor ultrassônico HC-SR04, utilizado para medir o nível de água dos reservatórios, e um microcontrolador NodeMCU ESP8266 Single-core 32 bits, com 16 KBytes

² <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/pubsubclient/>

(quilobytes) de memória RAM, Wi-Fi integrado e suporte à execução de programas (ver Figura 3).



Figura 3 – Dispositivo IoT

3.1.2 Protocolo de Comunicação

Conforme mencionado anteriormente, o **Aquasense** utiliza o protocolo MQTT como principal meio de comunicação entre seus componentes. Esse protocolo é amplamente adotado em aplicações IoT por ser leve, assíncrono e eficiente na troca de mensagens entre dispositivos e serviços (CAVALCANTI; HUGHES; ROSA, 2023). Além disso, o MQTT³ destaca-se pela fácil implementação e baixo consumo de recursos computacionais e energia, características essenciais para ambientes com restrições, como os em que o **Aquasense** opera.

Na implementação do **Aquasense**, a troca de mensagens é gerenciada por um *Broker* MQTT⁴, que atua como intermediário entre o Cliente **Aquasense** e o Serviço **Aquasense**. O *Broker* é um serviço de mensagens que o Cliente **Aquasense** utiliza para publicar mensagens. Da mesma forma, o Serviço **Aquasense** subscreve ao *Broker* para receber essas mensagens publicadas. O *Broker* armazena as mensagens, gerencia os tópicos e os assinantes, e notifica os assinantes interessados em um tópico específico.

No entanto, quando se trata de mensagens relacionadas a adaptações do sistema, é necessária uma comunicação síncrona para que o dispositivo possa decidir, se deve ou não se adaptar. Nesses casos, a interação ocorre por meio de requisições HTTP⁵ entre o Cliente **Aquasense** e o Serviço **Aquasense**.

³ <https://www.hivemq.com/mqtt>

⁴ <https://www.hivemq.com>

⁵ <https://developer.mozilla.org/pt-BR/docs/Web/HTTP>

3.1.3 Serviço Aquasense

A Figura 4 apresenta uma visão geral do Serviço **Aquasense**, composto por três módulos: *API*, *Core* e o *Sistema Gerenciador*. Além disso, ele usa os módulos externos MQTT e *Broker*. O Serviço **Aquasense** é uma aplicação web responsável por processar os dados recebidos de dispositivos IoT, por meio da subscrição a tópicos no *Broker* via o módulo MQTT.

O módulo MQTT abstrai o processo de subscrição e garante o recebimento das mensagens publicadas pelos dispositivos. Sempre que novos dados são enviados ao *Broker*, o Serviço **Aquasense** os recebe automaticamente para posterior processamento.

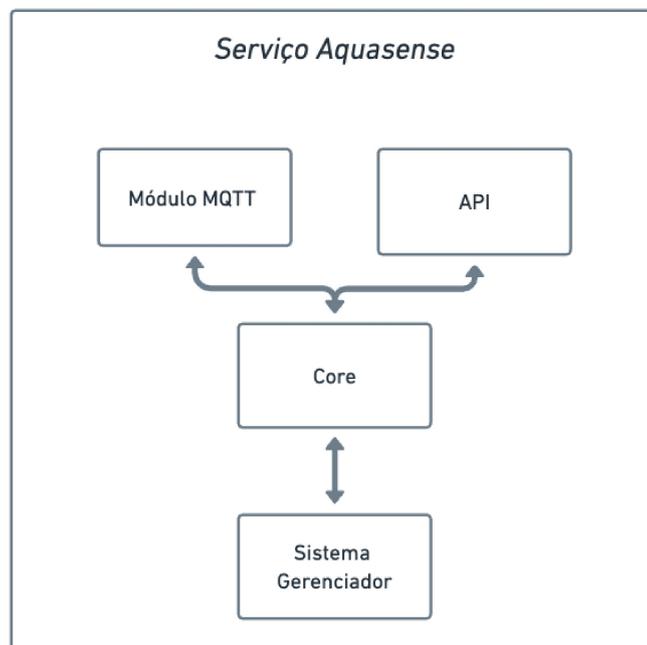


Figura 4 – Visão Geral do Serviço **Aquasense**

Após o recebimento, o módulo *Core* (ver Figura 5) analisa, processa e armazena os dados em um banco de dados, tornando-os acessíveis por meio de uma interface web. O módulo *Core* é composto por dois componentes: *Device* e *DeviceHistory*, responsáveis por operações de leitura e escrita, como criação, atualização e consulta de registros. Esses dados também podem ser acessados diretamente pelos usuários por meio da camada *API*.

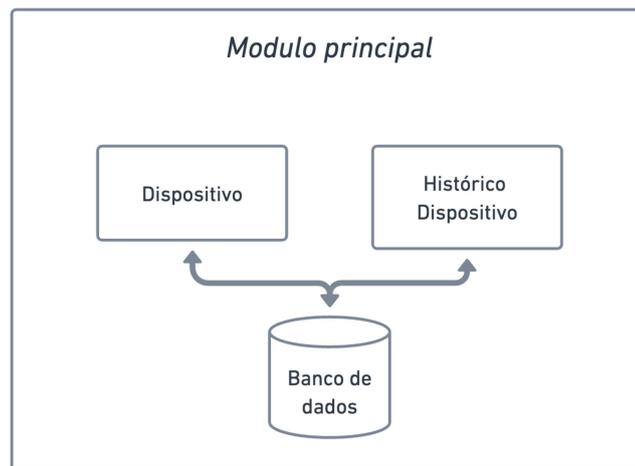
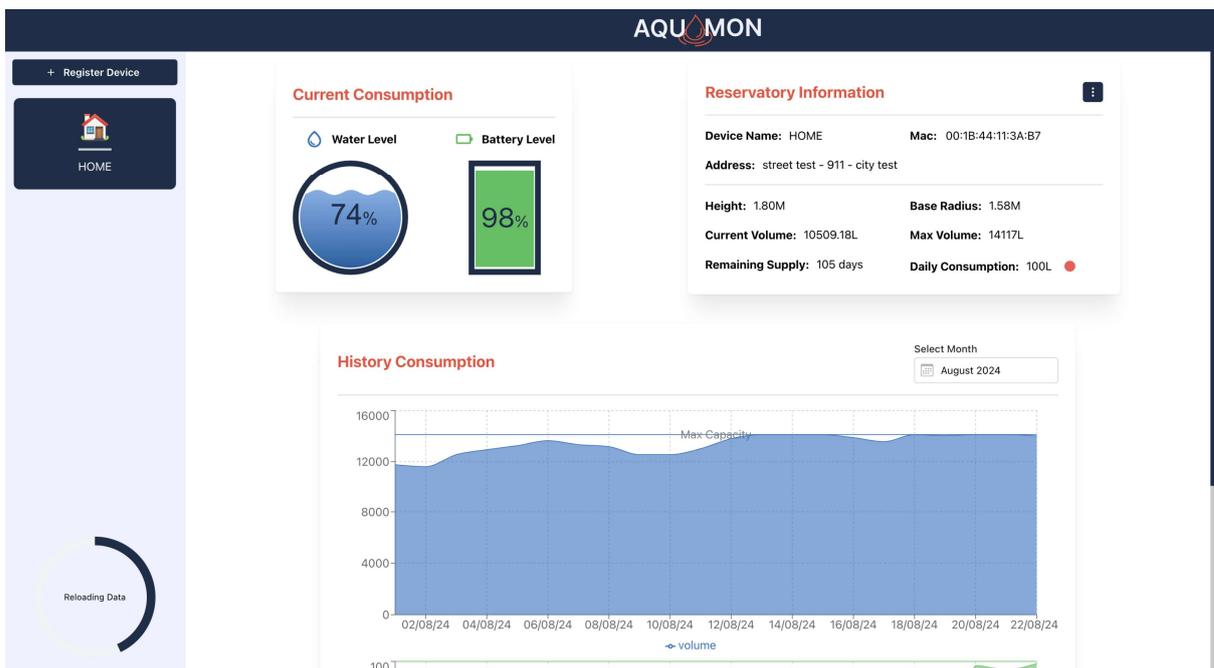


Figura 5 – Visão Geral do Módulo Core

A Figura 6 apresenta a interface web do **Aquasense**. Essa interface permite o registro de novos reservatórios, a edição de suas informações primárias, como nome e localização, e a exclusão dos mesmos.

Figura 6 – Interface web do **Aquasense**

A partir dessa interface, os usuários recebem feedback digital sobre a cisterna, como suas dimensões e capacidade, volume de água atual, consumo diário acumulado, dias de disponibilidade restante de água com base no histórico de uso e o nível da bateria do dispositivo. Espera-se que esse feedback digital faça parte de uma estratégia de engajamento do cliente,

com o objetivo de mudar o comportamento do consumidor, fornecendo informações sobre o uso da água.

Finalmente, o *Core* também é responsável por iniciar o processo de adaptação. Ele recebe requisições de adaptação enviadas pelos dispositivos e as repassa para o *Sistema Gerenciador*, que executa as ações de adaptação correspondentes, conforme detalhado na seção 3.1.4.

3.1.4 Sistema Gerenciador

O *Sistema Gerenciador* orquestra as adaptações no **Aquasense**. Quando uma adaptação é necessária, o dispositivo envia uma mensagem de adaptação para o *Sistema Gerenciador*. Ele recebe um plano de adaptação com os elementos necessários, como novos valores de parâmetros para alterar o comportamento da aplicação (por exemplo, frequência de medição) e executa o plano. Essa abordagem garante que o **Aquasense** possa se ajustar dinamicamente às condições em mudança, sem a necessidade de recompilar ou parar completamente.

Em ambientes desafiadores, podem surgir incertezas devido a variações nos objetivos do usuário, flutuações na disponibilidade de recursos ou mudanças no contexto da aplicação IoT. Como os dispositivos IoT são alimentados por bateria e a vida útil da bateria é uma das incertezas mais críticas, preservá-la em ambientes desafiadores é essencial, já que a troca delas pode ser custosa ou até impossível. Nesse sentido, o **Aquasense** atualmente possui um mecanismo de adaptação paramétrico, desenvolvido para economizar energia em dispositivos IoT. O mecanismo de adaptação ajusta o tempo de monitoramento para encurtar ou estender a operação do **Aquasense** com base no volume de água para economizar energia e maximizar a vida útil da bateria.

A Figura 7 apresenta a visão geral do *Sistema Gerenciador*. A lógica de adaptação do mecanismo é implementada de acordo com o ciclo de feedback MAPE-K (COMPUTING et al., 2006). O *Monitor* (M), monitora o volume de água e o nível de bateria dos dispositivos e armazena esses valores no *knowledge* (K). Em seguida, essas informações são enviadas para o *Analizador* (A), que recebe esses valores (por exemplo, volume atual da cisterna) e decide se uma adaptação é necessária.

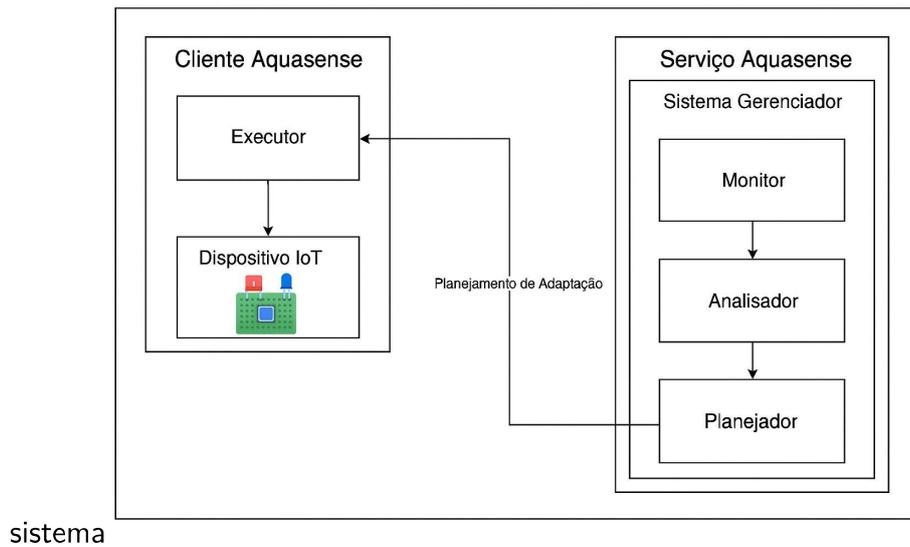


Figura 7 – Visão do Sistema Gerenciador

A decisão é com base em um conjunto de regras customizáveis definidas em um motor de regras, implementados com base no modelo proposto por Cavalcanti, Hughes e Rosa (CAVALCANTI; HUGHES; ROSA, 2023).

A Tabela 1 mostra um exemplo de regras personalizadas para o Aquasense. Essas regras alteram a frequência de monitoramento de uma aplicação ajustando o parâmetro de tempo de "deep-sleep" com base em uma condição específica.

Nível da Cisterna	Condição	Ação do Sistema Aquasense
Seguro	Nível \geq 50	Monitoramento a cada 60 minutos
Normal	$25 <$ Nível $<$ 50	Monitoramento a cada 30 minutos
Crítico	Nível \leq 25	Monitoramento a cada 15 minutos

Tabela 1 – Motor de Regras do Aquasense para Monitoramento de Nível da Cisterna

Por exemplo, as regras expressam que o **Aquasense** monitora o nível de água de uma cisterna a cada 30 minutos quando o nível está "normal" acima de 25% e abaixo de 50%. Em contra partida, o monitoramento precisa ser intensificado (por exemplo, monitorar a cada 15 minutos) quando a cisterna atinge um "nível crítico", por exemplo, abaixo de 25%.

Ao receber os dados, o *Analisador* avalia essas regras para decidir se uma adaptação é necessária. Se for necessário, ele encaminha essa decisão para o *Planejador* (P). O *Planejador* cria um plano de adaptação, que consiste em uma sequência de ações (por exemplo, ajustar um parâmetro e carregá-lo) que devem ser enviadas e executadas no dispositivo.

Por fim, o *Executor* (E) ajusta o parâmetro no dispositivo ao executar o plano de adaptação sem precisar interromper o dispositivo ou recompilar o Aquasense.

É importante observar que o processo de adaptação é transparente para o **Aquasense**, ou seja, a adaptação ocorre, mas o código da aplicação, com ou sem as facilidades de adaptação, é o mesmo, e a adaptação acontece apenas no momento de inatividade da aplicação. Além disso, a lógica de adaptação com MAPE-K é implementada de forma distribuída no sistema. O *Monitor*, *Analizador* e *Planejador* estão incorporados no Serviço **Aquasense** e o Executor está no próprio dispositivo como pode ser observado na Figura 7.

Essa abordagem distribuída e descentralizada do mecanismo de adaptação é essencial na IoT, pois ajuda a economizar recursos computacionais e energia, onde parte do processamento de análise e tomada de decisão quanto à adaptação é feita no Serviço **Aquasense** onde a disponibilidade de recursos é maior por ser um componente executado em nuvem ao contrário do Aquasense Client que utiliza os recursos do próprio dispositivo.

3.1.5 Implementação

Os componentes do Cliente **Aquasense** foram implementados⁶ utilizando a plataforma Arduino e o Serviço Aquasense utiliza o ecossistema JavaScript como conjunto de tecnologias de desenvolvimento principal. O núcleo do sistema, denominado *Core*, e toda a camada de serviço responsável pelo processamento dos dados e pela implementação das regras de negócio, foram desenvolvidos com o framework Nest.js⁷, uma poderosa ferramenta para construção de aplicações backend em JavaScript. Para a interface web, foi utilizada a biblioteca React.js⁸, que permite o desenvolvimento de interfaces reativas e dinâmicas de forma eficiente.

O Aquasense utiliza o banco de dados utilizado no sistema é uma instância Postgres⁹, um banco relacional que comporta a modelagem com as tabelas *Device* e *Device History* que pode ser observada na Figura 8.

⁶ <https://github.com/Fernandez/water-control>

⁷ <https://nestjs.com/>

⁸ <https://react.dev/>

⁹ <https://www.postgresql.org/>

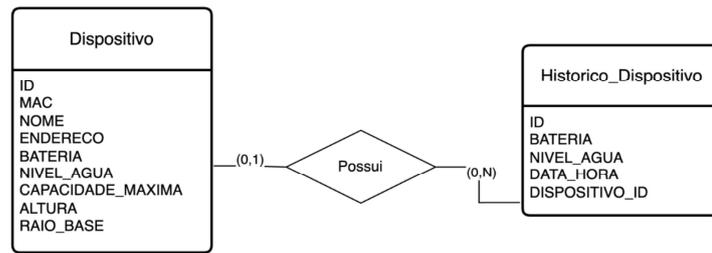


Figura 8 – Modelagem de Banco de Dados do **Aquasense**

Device é responsável por guardar informações primárias da reservatório como as medidas (cm) e o endereço MAC do dispositivo além do volume de água e nível de bateria atual, já Device History guarda as informações de volume de água e nível de bateria em determinado momento para ser consultado posteriormente na exibição do histórico ou para análise de comportamento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, é feita a avaliação do **Aquasense** e apresentados os resultados. Inicialmente, apresenta-se uma visão geral do desenvolvimento do **Aquasense** e de seus princípios. Em seguida, são descritos a avaliação experimental e os resultados obtidos.

4.1 VISÃO GERAL

Os resultados abrangem a própria implementação¹ do **Aquasense**, incluindo a aplicação IoT (Cliente **Aquasense**) que executa dentro do dispositivo e o serviço **Aquasense** demonstrados através do seu uso, conforme a interface do usuário mostrada na Figura 6, e, finalmente, uma avaliação experimental que mostra sua capacidade de adaptação.

O desenvolvimento do **Aquasense** seguiu uma metodologia de pesquisa baseada no projeto, refinando iterativamente sua arquitetura e capacidades de adaptação com base em validações experimentais. Como mencionado na seção 3, o **Aquasense** é uma solução IoT holística e adaptativa, projetada para monitorar o uso de água e fornecer feedback digital aos consumidores, particularmente em áreas economicamente desfavorecidas. Embora possa ser personalizada para qualquer ambiente, ela é principalmente voltada para operar em cisternas de água em regiões semiáridas do Brasil. As regiões semiáridas são caracterizadas por acesso limitado a recursos (por exemplo, pobreza), calor intenso devido ao sol forte, escassez de água durante períodos prolongados e distanciamento dos centros urbanos. Consequentemente, as pessoas usam cisternas para armazenar água da chuva durante os períodos secos. O **Aquasense** tem como objetivo ajudar essas pessoas, fornecendo estratégias para conservar água.

Essas características, somadas às relacionadas aos ambientes IoT — como recursos computacionais limitados e baixo consumo de energia, refletem os requisitos do sistema e orientam o desenvolvimento de uma solução eficiente e eficaz.

Nesse contexto, dois princípios básicos se complementam e definem o que é o **Aquasense**:

1. **Princípio Social:** O **Aquasense** prioriza as necessidades humanas e o impacto social que pode gerar, visando capacitar as comunidades por meio da tecnologia para uma melhor gestão dos recursos hídricos. Ele incentiva as famílias a mudarem seus comportamentos de consumo para economizar água, o que inclui tornar a tecnologia acessível e

¹ <https://github.com/Fernandez/water-control>

economicamente viável, garantindo que atenda às necessidades específicas de áreas economicamente desfavorecidas, ajudando os usuários a tomarem decisões informadas sobre a conservação da água e aumentando a conscientização sobre práticas sustentáveis..

2. **Princípio Operacional:** O **Aquasense** assegura que o sistema permaneça confiável, eficiente e adaptável mesmo em ambientes desafiadores de IoT. Em particular, ao contrário das soluções existentes, o **Aquasense** incorpora componentes de baixo custo e acessíveis, além de adotar conceitos adaptativos para lidar com incertezas ambientais e operacionais. Ele utiliza mecanismos adaptativos para economizar energia nos dispositivos IoT, prolongando a vida útil dos sensores e reduzindo as necessidades de manutenção. O **Aquasense** permite monitoramento contínuo, análise e adaptação. Essa característica garante operação confiável em condições severas, incluindo escassez de recursos e conectividade limitada..

4.2 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

Essa avaliação experimental tem o objetivo de analisar o impacto da adaptação do **Aquasense** no consumo de energia do dispositivo, ao mesmo tempo em que melhora o desempenho do **Aquasense** para garantir uma operação eficiente e aumentar a vida útil da bateria.

4.2.1 Cenário do Experimento

O cenário de experimento inclui **Aquasense** e utiliza uma abordagem empírica que combina o dispositivo IoT com o comportamento simulado de consumo de água em um ambiente controlado. Ele segue uma arquitetura centralizada tradicional de aplicação IoT, incorporando um controlador, sensores e uma aplicação para exibição de dados. O dispositivo executa o Cliente **Aquasense** (publicador), que monitora periodicamente o nível de água de uma cisterna doméstica. O Serviço **Aquasense** (subscriber) é executado na nuvem e processa e exibe os dados monitorados por meio de uma interface web. O publicador e o assinante foram implementados sobre o middleware MQTT.

4.2.2 Métrica, Parâmetros e Fatores

A métrica adotada no experimento foi o *Consumo de Energia*. O consumo de energia corresponde à quantidade de energia utilizada por um dispositivo durante sua execução, especificamente enquanto realiza o ciclo de trabalho (*duty cycle*). O *duty cycle* permite que os dispositivos alternem periodicamente entre períodos ativos (por exemplo, amostragem e transmissão) e inativos (por exemplo, modo de espera), visando o uso mínimo de energia.

Os parâmetros utilizados são: adaptação habilitada ou desabilitada durante a execução do **Aquasense**, e o tempo de inatividade. Quando a adaptação está desabilitada, esse tempo é padronizado em 30 segundos. Quando a adaptação está habilitada, considera-se uma frequência de leitura adaptável, presente no cenário com adaptação, em que o tempo de inatividade varia de acordo com o nível de água ou o horário do dia. Ou seja, o sistema ajusta automaticamente o período em que o dispositivo permanece inativo. Com a adaptação habilitada, esse tempo varia dinamicamente entre 15, 30 e 60 segundos durante a execução, levando em conta tanto as variações no nível de água quanto os momentos de maior demanda de consumo. Em um nível de água seguro, o dispositivo opera com 60 segundos de inatividade; em um nível normal, esse período é de 30 segundos. Em situações críticas de nível de água ou durante os horários de pico de consumo (meio-dia e entre 18h e 20h), o tempo de inatividade é reduzido para 15 segundos. Por outro lado, no horário de baixo consumo (das 22h às 5h), o dispositivo retorna a um período de inatividade de 60 segundos.

4.2.3 Avaliação do Impacto da Adaptação na Vida Útil da Bateria

O comportamento de consumo de água utilizado para determinar os níveis medidos pelo dispositivo foi baseado no padrão de consumo doméstico apresentado por (MARZALL; NASCIMENTO, 2023).

Durante o experimento, foi coletado o consumo de energia tanto durante os períodos de atividade quanto de inatividade. Para cada rodada de avaliação, realizaram-se medições do consumo de energia, quantificado em miliwatts (mW), nos estados ativo e inativo do dispositivo. Adicionalmente, registrou-se o tempo médio de permanência em cada um desses estados. Por fim, foi estimada a duração da bateria, considerando uma bateria com capacidade de 3000 miliampère-hora (mAh) .

Os dados coletados foram processados, e estatísticas descritivas (média, variação) foram

calculadas para cada cenário. Além disso, realizou-se uma análise comparativa dos resultados para verificar se a adaptação proporcionou uma melhora estatisticamente significativa na vida útil da bateria.

A Figura 9 apresenta os resultados do experimento. O dispositivo com a adaptação desabilitada apresentou um consumo médio de 300 mW no estado ativo e 50 mW no estado inativo, com tempos médios de 9 segundos e 30 segundos, respectivamente. No cenário com adaptação habilitada, o consumo médio foi de 282,6 mW no estado ativo e 40,5 mW no estado inativo, com tempo médio de 8 segundos no estado ativo e variações de 15, 30 e 60 segundos no estado inativo.

Apesar da diferença de consumo ser relativamente pequena, a adaptação proporcionou um aumento de aproximadamente 2% na vida útil da bateria, um valor que pode ser significativo em ambientes IoT desafiadores, especialmente quando se considera a economia em escala de meses, dias ou até anos.

É importante mencionar que os fatores de tempos de inatividade foram extrapolados em segundos para mostrar a adaptação em ação, mas em um cenário real podem ser expressos em minutos ou horas, aumentando ainda mais os benefícios.

Além disso, os resultados demonstram que a capacidade de adaptação, ao permite ajustar dinamicamente parâmetros da aplicação, em tempo de execução, pode ser extremamente útil em outros cenários. Por exemplo, é possível integrar uma válvula inteligente que seja controlada dinamicamente quando o consumo de água estiver acima do normal, o que pode indicar consumo excessivo ou mesmo desperdício por vazamento.

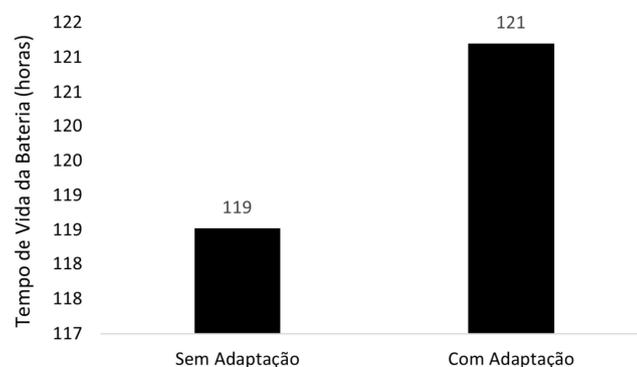


Figura 9 – Tempo de vida de uma bateria de 3000 mAh nos dois cenários

Com o objetivo de compreender o impacto acumulado dessa economia de energia ao longo

do tempo, foi realizada uma projeção da autonomia do dispositivo ao longo de um período de 12 meses. Considerando uma bateria de 3000 mAh e mantendo o padrão de consumo observado nos testes, foram estimados os ciclos de recarga necessários para cada cenário.

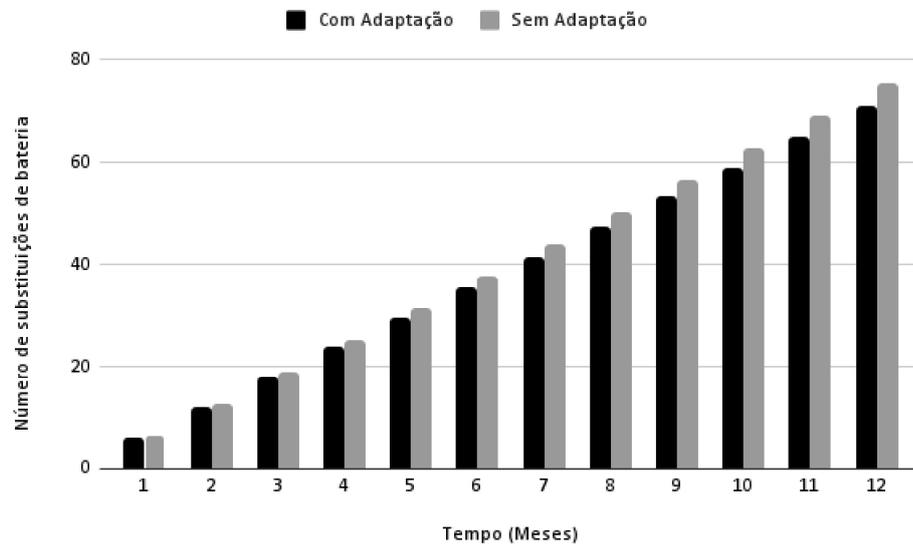


Figura 10 – Trocas de bateria com e sem adaptação

A Figura 10 apresenta a projeção do número acumulado de trocas da bateria ao longo de 12 meses para os cenários com e sem adaptação do sistema **Aquasense**. A análise revela que, embora a diferença na autonomia por ciclo seja aparentemente modesta, com 0,17 meses para o cenário com adaptação e 0,16 meses para o cenário sem, o impacto acumulado é significativo. Ao final de um ano, o cenário com adaptação requer aproximadamente 71 trocas de bateria, enquanto o cenário sem adaptação demanda cerca de 75.

A diferença percentual entre as estratégias é de aproximadamente 5,87% de ganho para o cenário com adaptação. Essa redução representa uma economia de recursos e manutenção, especialmente relevante em contextos de larga escala com múltiplos dispositivos IoT operando em no ambiente. A projeção reforça o benefício do ajuste dinâmico do tempo de inatividade na eficiência energética do sistema.

5 CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta a conclusão do trabalho, algumas limitações encontradas no decorrer do desenvolvimento da solução e sugestões de trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÃO

A crise hídrica no Brasil acendeu alertas relacionados ao uso consciente da água, principalmente em regiões semiáridas, onde a escassez é agravada pelo clima e pelos longos períodos de seca. Durante esse período, essas regiões utilizam a água das cisternas, que são reservatórios para armazenar a água da chuva, a fim de garantir o abastecimento durante a seca. No entanto, é necessário adotar um consumo inteligente de água, especialmente em residências, para que o recurso dure durante todo esse período. Evitar o desperdício é fundamental, principalmente quando ele ocorre por uso não controlado e mal gerido do recurso.

As soluções inteligentes, conhecidas como *smart water*, um subdomínio de cidades inteligentes na IoT, podem ajudar, utilizando sistemas capazes de monitorar o consumo de água de forma automática e fornecer *feedbacks* automáticos, auxiliando os usuários no consumo consciente.

Nesse contexto, este trabalho projetou e implementou o **Aquasense**, uma aplicação de monitoramento de consumo de água inteligente e auto-adaptativa, desenvolvida para ajudar os usuários (por exemplo, consumidores) a melhorar a conservação de água em ambientes desafiadores, como os semiáridos. O **Aquasense** integra um dispositivo de baixo custo, construído com componentes de fácil acesso, junto a uma aplicação web para interação com o usuário. As adaptações do **Aquasense** garantem um monitoramento confiável da água, mesmo em ambientes caracterizados por conectividade limitada, restrições de energia e necessidades variáveis dos usuários.

Além de suas conquistas técnicas, o **Aquasense** enfatiza o impacto social, capacitando as comunidades a gerenciar os recursos hídricos de forma mais eficaz. O feedback digital do **Aquasense** promove a mudança de comportamento, incentivando os lares a conservar água e adotar práticas sustentáveis.

5.2 LIMITAÇÕES

Embora o **AquaSense** atenda às decisões de projeto propostas e cumpra as funcionalidades definidas, algumas limitações precisam ser consideradas. As adaptações ainda são limitadas, e mais mecanismos de adaptação devem ser implementados, como aqueles baseados no nível do reservatório ou nos horários de consumo. A ausência de mecanismos proativos limita a capacidade do sistema de antecipar e lidar com incertezas de forma antecipada. Mecanismos corretivos também estão ausentes, o que poderia melhorar a capacidade do sistema de corrigir falhas após sua ocorrência.

Além disso, a avaliação e simulação do **AquaSense** foram realizadas em ambientes controlados, que, embora demonstrem a capacidade do sistema, não reproduzem completamente as condições reais. Testes em cenários reais, como regiões semiáridas com cisternas e outras restrições, são necessários para validar a robustez e a eficácia do sistema. Durante os experimentos, algumas limitações empíricas foram identificadas, como imprecisões nas leituras dos sensores, especialmente em distâncias maiores ou com a bateria próxima do fim. Esses problemas sugerem que a melhoria da precisão pode exigir modificações no dispositivo ou a adição de sensores suplementares para aumentar a confiabilidade e o desempenho.

5.3 TRABALHOS FUTUROS

Alguns trabalhos futuros são propostos para enfrentar as limitações identificadas e ampliar as contribuições do **AquaSense**.

Inicialmente, o foco será na evolução da aplicação web. Melhorias na usabilidade e no desempenho da interface, incluindo sua adaptação para dispositivos móveis e a reformulação do design, são fundamentais para oferecer uma experiência mais prática, acessível e satisfatória aos usuários.

Outra frente importante do projeto é a implementação de mecanismos de adaptação, complementando os já existentes. Mecanismos proativos, baseados em inteligência artificial — como ARIMA, LSTM ou Random Forest — podem antecipar incertezas e otimizar o desempenho do sistema. Já estratégias corretivas, baseadas na Teoria de Controle, podem fornecer garantias matemáticas que assegurem, por exemplo, que a bateria dos dispositivos não se esgote totalmente, mesmo em situações de alto consumo.

Também é essencial realizar experimentos em condições reais, como em regiões semiáridas

com o uso de cisternas e a participação de usuários. Esses testes são fundamentais para validar o funcionamento do **AquaSense** em cenários práticos, permitindo avaliar sua eficácia, robustez, usabilidade e a percepção dos usuários.

Por fim, a implementação de camadas de segurança, como o uso de TLS¹ e a inclusão de serviços de autenticação na interface e no servidor do **Aquasense**, é um passo importante para garantir a confiabilidade, a integridade dos dados e o controle adequado de acesso à solução.

5.4 PUBLICAÇÕES

Este trabalho também integra o projeto de Iniciação Científica intitulado "Promovendo adaptação de middleware para internet das coisas". Durante o desenvolvimento do **AquaSense**, foram publicados dois artigos. Um está diretamente relacionado ao **AquaSense** e o outro contribuiu para a construção do conhecimento que fundamenta este trabalho:

- OLIVEIRA, Angelo Fernandes Brandão; CAVALCANTI, David Júnio Mota. *AQUASENSE: Uma Solução Adaptativa Baseada em IoT para Monitoramento de Consumo de Água em Ambientes Desafiadores*. In: Anais do XIV Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação (CONNEPI). Belém (PA): IFPA, 2024. Disponível em: <<https://encurtador.com.br/BAVBj>>. Acesso em: 10/05/2025.
- CAVALCANTI, D. J. M.; JR., E. B.; ROSA, N.; OLIVEIRA, A.; HUGHES, D. *AquaMOM: Adaptive IoT System for Water Monitoring in Challenging Environments*. In: Proceedings of the 10th IEEE International Smart Cities Conference, 2024. (Aceito para publicação)

¹ <https://www.cloudflare.com/pt-br/learning/ssl/transport-layer-security-tls/>

REFERÊNCIAS

- AGOSTINHO, B. M.; ROTTA, G.; PLENTZ, P. D. M.; DANTAS, M. A. Smart comm: A smart home middleware supporting information exchange. In: IEEE. *IECON 2018-44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. [S.l.], 2018. p. 4678–4684.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). *Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil*. [S.l.], 2024. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/central-de-publicacoes/ana_manual_de_usos_consuntivos_da_agua_no_brasil.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2024.
- ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. The Internet of Things : A survey. *Computer Networks*, Elsevier B.V., v. 54, n. 15, p. 2787–2805, 2010. ISSN 1389-1286. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>>.
- BRITO, A. D.; LOPES, J. C.; NETA, M. M. S. dos A. Tripé da governança: Poder público, setor privado e a sociedade civil em busca de uma gestão integrada dos recursos hídricos. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, v. 8, n. 4, p. 506–522, 2019.
- CAVALCANTI, D.; HUGHES, D.; ROSA, N. An adaptive energy saving mechanism for middleware of things. In: IEEE. *2023 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*. [S.l.], 2023. p. 1–6.
- CAVALCANTI, D.; ROSA, N. Customizable and adaptable middleware of things. *International Journal of Communication Systems*, v. 37, n. 15, p. e5887, 2024. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/dac.5887>>.
- COMPUTING, A. et al. An architectural blueprint for autonomic computing. *IBM White Paper*, Citeseer, v. 31, n. 2006, p. 1–6, 2006.
- COSTA, D. G.; PEIXOTO, J. P. J.; JESUS, T. C.; PORTUGAL, P.; VASQUES, F.; RANGEL, E.; PEIXOTO, M. A survey of emergencies management systems in smart cities. *IEEE Access*, IEEE, v. 10, p. 61843–61872, 2022.
- FRANÇA, F.; OLIVEIRA, J. d.; ALVES, J.; FONTENELE, F.; FIGUEIREDO, A. *Cisterna de laje: construção, uso e manutenção*. Fortaleza: Secretaria de Recursos Hídricos, 2010.
- GETIRANA, A.; LIBONATI, R.; CATALDI, M. Brazil is in a water crisis - it needs a drought plan. *Nature*, p. 218–220, 2021.
- GONDIM, J.; FIOREZE, A. P.; ALVES, R. F. F.; SOUZA, W. G. d. A seca atual no semiárido nordestino–impactos sobre os recursos hídricos. *Parcerias Estratégicas*, v. 22, n. 44, p. 277–300, 2017.
- HAN, Q.; MEHROTRA, S.; VENKATASUBRAMANIAN, N. Aquaeis: Middleware support for event identification in community water infrastructures. In: *20th International Middleware Conference*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 293–305.
- HASSAN, H.; MAZLAN, M. L. Q.; IBRAHIM, T. N. T.; KAMBAS, M. F. lot system: Water level monitoring for flood management. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. [S.l.: s.n.], 2020. International Conference on Technology, Engineering and Sciences.

- II, N. B. T.; ALLOSO, M. S. P.; RABAGO, J. M. G.; LACSA, M. L. E.; SUDARIA, P. R. A. B.; GUMONAN, K. M. V. C. Aquamag: Smart water quality monitoring through internet of things. *International Journal of Science, Technology, Engineering and Mathematics*, Institute of Industry and Academic Research Incorporated, v. 3, n. 1, p. 1–18, 2023.
- KANT, K.; JOLFAEI, A.; MOESSNER, K. Iot systems for extreme environments. *IEEE Internet of Things Journal*, IEEE, v. 11, n. 3, p. 3671–3675, 2024.
- KUMAR, S.; YADAV, S.; YASHASWINI, H.; SALVI, S. An iot-based smart water microgrid and smart water tank management system. In: SPRINGER. *Emerging Research in Computing, Information, Communication and Applications: ERCICA 2018, Volume 2*. [S.l.], 2019. p. 417–431.
- LAKSHMIKANTHA, V.; HIRIYANNAGOWDA, A.; MANJUNATH, A.; PATTED, A.; BASAVAIHAH, J.; ANTHONY, A. A. Iot based smart water quality monitoring system. *Global Transitions Proceedings*, Elsevier, v. 2, n. 2, p. 181–186, 2021.
- LIU, A.; MUKHEIBIR, P. Digital metering feedback and changes in water consumption – a review. *Resources, Conservation, Recycling and Recycling*, p. 136–148, 2018.
- MALCHE, T.; MAHESHWARY, P. Internet of things (iot) based water level monitoring system for smart village. In: SPRINGER. *Proceedings of International Conference on Communication and Networks: ComNet 2016*. [S.l.], 2017. p. 305–312.
- MARZALL, V. O. A. R.; NASCIMENTO, N. Determinação do perfil de consumo residencial de água potável apoiado em tecnologia de medição inteligente. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 2023.
- MUKHOPADHYAY, A.; SREENADH, M.; ANOOP, A. ehealth applications: a comprehensive approach. In: IEEE. *2020 International Conference on Emerging Trends in Information Technology and Engineering (ic-ETITE)*. [S.l.], 2020. p. 1–6.
- RODRIGUEZ, R. d. G.; PRUSKI, F.; SINGH, V. Projeto de cisterna para uso doméstico de água em regiões semiáridas. *International Journal of Engineering Research and Technology*, v. 5, p. 695–702, mar. 2016.
- SINGH, M.; AHMED, S. Iot based smart water management systems: A systematic review. *Materials Today: Proceedings*, p. 5211–5218, 2020.
- SISINNI, E.; SAIFULLAH, A.; HAN, S.; JENNEHAG, U.; GIDLUND, M. Industrial internet of things: Challenges, opportunities, and directions. *IEEE transactions on industrial informatics*, IEEE, v. 14, n. 11, p. 4724–4734, 2018.
- WEYNS, D.; RAMACHANDRAN, G. S.; SINGH, R. K. Self-managing internet of things. In: *SOFSEM: Theory and Practice of Computer Science*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 67–84.