



**Politécnico
Castelo Branco**

Escola Superior
de Tecnologia



Monitorização remota de uma instalação experimental de controlo de água

Projeto I

Bruno Alexandre Dias Proença, 20210939

Diogo André Bernardino Canoso, 20210480

Orientadores

Eurico Ribeiro Lopes

Luís Miguel Santos Silva de Ascensão Barata

Trabalho de Projeto apresentado à Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco e aos Serviços Municipalizados de Castelo Branco para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Licenciado em Engenharia Informática, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Eurico Ribeiro Lopes e coorientação do Especialista Luís Miguel Santos Silva de Ascensão Barata, do Instituto Politécnico de Castelo Branco.

Janeiro 2025

Composição do júri

Presidente do júri

Mestre, Paulo Alexandre Correia da Silva Neves

Professor Adjunto, Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco

Vogais

Doutor, João Manuel Leitão Pires Caldeira

Professor Adjunto, Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco

Doutor, Eurico Ribeiro Lopes

Professor Coordenador, Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco

Dedicatória

Bruno Proença:

Este projeto é dedicado, antes de tudo, ao meu amigo e colega Diogo Canoso. Ao longo de todos estes anos de faculdade, trabalhamos lado a lado, aprendemos juntos e partilhamos muitas conquistas. A confiança mútua e a dedicação permitiram-nos transformar ideias em resultados, e este projeto é, sem dúvida, reflexo desse esforço conjunto.

Agradeço também à minha família, que sempre foi a base de tudo, um apoio incondicional em todos os momentos da minha vida. Aos meus pais, especialmente, por me encorajarem a sonhar grande e por nunca medirem esforços para me ajudar a alcançar os meus objetivos. Aos meus amigos e colegas, que tornaram esta jornada mais leve e motivadora, e aos professores que, com paciência e sabedoria, guiaram o meu crescimento académico e pessoal ao longo destes anos.

Diogo Canoso:

Dedico este projeto inicialmente ao meu colega e amigo Bruno Proença. Desde o primeiro ano de faculdade mantivemo-nos juntos a realizar trabalhos no âmbito de várias unidades curriculares. Conseguimos, em conjunto, acreditar neste projeto e, com esforço mútuo, superar desafios que levassem a cabo o nosso projeto.

À minha família, por ser o meu pilar em todas as fases da minha vida, em especial aos meus pais, que sempre me incentivaram a estudar e a seguir as minhas ambições. Aos meus amigos e colegas por todo o acompanhamento nesta etapa dinâmica e proativa e por fim, especialmente aos professores que estiveram envolvidos durante estes três anos e também por me terem inculcido valores indispensáveis tanto para o meu sucesso académico, como também profissional. Além disso, dedico este projeto a todos aqueles que acreditam que seguir esta licenciatura, é um caminho para atingir um grande sucesso no futuro.

Agradecimentos

A elaboração deste projeto, no âmbito do Projeto I, não teria sido possível sem a colaboração, estímulo, empenho de inúmeras pessoas. Gostaríamos, por isso de expressar todo o nosso agradecimento e consideração a todas as pessoas que direta e indiretamente nos ajudaram na realização deste projeto e no curso em geral.

Agradecemos, em primeiro lugar ao Mestre Luís Miguel Santos Silva de Ascensão Barata, por todos os esclarecimentos e ensinamentos que se tornaram fundamentais para o desenvolvimento deste projeto. A sua orientação e recomendação foi sem dúvida benéfica e gratificante para o êxito do Projeto I. Gostaríamos também de agradecer, à Engenheira Susana Valente, o seu apoio, tal como a sua disponibilidade que foram essenciais para o desenrolar deste projeto em conjunto com os Serviços Municipalizados de Castelo Branco.

Agradecemos igualmente aos restantes professores do curso que possibilitaram o enriquecimento dos nossos conhecimentos que foram adquiridos ao longo destes três trabalhosos anos.

Além disso, agradecemos também às nossas famílias, por todo o apoio, paciência e compreensão no decorrer deste curso. Em especial, aos nossos pais pelos estímulos que sempre nos transmitiram para estudar e empenhar-nos nas mais diversas situações.

Por fim, gratulamos os nossos amigos e colegas de curso que nos acompanharam nesta fase da nossa vida e por todas as ideias, opiniões e ajudas que concederam.

Resumo

O desperdício de água nos sistemas de medição tem sido um problema crescente, com impactos significativos na sustentabilidade e na eficiência dos recursos hídricos. Este projeto centra-se na otimização da gestão de hidrómetros, com ênfase na utilização de tecnologias avançadas, como a Internet das Coisas (IoT), Narrowband-IoT (NB-IoT) e medição inteligente. O projeto identifica diferentes tecnologias e apresenta soluções inovadoras para reduzir perdas e melhorar a precisão na medição do consumo de água. Além disso, é avaliada a viabilidade da implementação da tecnologia NB-IoT na região de Castelo Branco, considerando métricas de desempenho relacionadas com a conectividade e a infraestrutura disponível. O trabalho inclui o desenvolvimento inicial de um protótipo que utiliza uma arquitetura baseada na Internet das Coisas e computação em nuvem, garantindo a monitorização remota em tempo real. Os resultados demonstram que a modernização dos sistemas de medição, pode não apenas minimizar desperdícios, mas também transformar a gestão hídrica, tornando-a mais eficiente, sustentável e conectada.

Palavras-chave

Medição inteligente de água, Internet das Coisas, Narrowband-IoT, Monitorização do consumo de água, Gestão de recursos hídricos.

Abstract

Water waste in measurement systems has been a growing problem, with significant impacts on the sustainability and efficiency of water resources. This project focuses on optimizing water meter management, with an emphasis on the use of advanced technologies, such as the Internet of Things (IoT), Narrowband-IoT (NB-IoT) and smart metering. The project identifies different technologies and presents innovative solutions to reduce losses and improve accuracy in measuring water consumption. Furthermore, the implementation of NB-IoT technology in the Castelo Branco region is evaluated, considering performance metrics related to connectivity and available infrastructure. The work includes the initial development of a prototype that uses an architecture based on the Internet of Things and cloud computing, ensuring remote monitoring in real time. The results demonstrate that modernizing measurement systems can not only minimize waste, but also transform water management, making it more efficient, sustainable and connected.

Keywords

Smart water metering, Internet of Things, Narrowband-IoT, Water consumption monitoring, Water resources management.

Índice geral

1	<i>Introdução</i>	1
1.1	Âmbito	1
1.2	Definição do Problema.....	2
1.3	Objetivos.....	2
1.4	Organização do Documento	4
2	<i>Estado da Arte</i>	5
2.1	Desperdício que causam os hidrómetros em números.....	6
2.2	Custo do Desperdício dos Hidrómetros	7
2.3	Tecnologias para Combater o Desperdício dos Hidrómetros	8
2.4	História dos Serviços Municipalizados de Água de Castelo Branco	10
2.5	Tipos de Contadores Existentes	11
2.6	Tecnologias IoT Frequentemente Utilizadas em Hidrómetros	17
2.7	Tecnologias IoT Utilizadas nos Diversos Continentes	25
3	<i>Análise de Soluções Tecnológicas para Hidrómetros</i>	29
3.1	Abordagens em Diferentes Setores do Desperdício dos Hidrómetros e Tecnologias Associadas	29
3.2	Setores do Desperdício de Hidrómetros	30
3.3	Análise Crítica dos Resultados	33
4	<i>Avaliação de Desempenho</i>	35
4.1	Apresentação da Tecnologia	35
4.2	Métricas de Desempenho	35
4.3	Cenário de Implementação.....	37
4.4	Mockup do Dashboard	39
4.5	Modelo E/R	40
4.6	Resultados e Discussão	41
5	<i>Conclusões e Trabalho Futuro</i>	43
5.1	Conclusões.....	43
5.2	Desafios e Trabalho Futuro.....	43
	<i>Referências Bibliográficas</i>	45

Índice de figuras

Figura 1 - Garantir a disponibilidade e a gestão sustentável da água potável e do saneamento para todos. Fonte: [9].....	6
Figura 2 - Representação dos dados da ERSAR para perdas de água nacionais. Fonte: [10].....	7
Figura 3 - Evolução das perdas reais no período 2018 - 2022. Fonte: [12].....	8
Figura 4 - Diferentes tecnologias aplicadas a hidrómetros. Fonte: [14]	9
Figura 5 - Funcionamento de um contador volumétrico. Fonte: [19].....	12
Figura 6 - Funcionamento de um contador volumétrico. Fonte: [19].....	13
Figura 7 - Funcionamento de um contador multijato. Fonte: [19], [26].....	13
Figura 8 - Funcionamento de um contador monojato. Fonte: [19], [26].....	14
Figura 9 - Funcionamento de um contador Woltmann. Fonte: [26].....	14
Figura 10 - Funcionamento de um contador Woltmann. Fonte: [29].....	15
Figura 11 - Demonstração da composição da tecnologia SigFox. Fonte: [36]	18
Figura 12 - Estrutura LoRaWAN. Fonte: [39]	19
Figura 13 - Estrutura NB-IoT e LTE-M. Fonte: [39].....	21
Figura 14 - Demonstração da modulação OFDM. Fonte: [46]	22
Figura 15 - Visão geral do mercado de LPWANs em 2021. Fonte: [57]	26
Figura 16 - Desempenho da cobertura de rede 4G na região de Castelo Branco.	36
Figura 17 - Cenário de implementação da tecnologia NB-IoT.....	37
Figura 18 - Elementos necessários para a implementação da tecnologia NB-IoT.	38
Figura 19 - Mockup do dashboard.	39
Figura 20 - Modelo E/R.....	40

Lista de tabelas

Tabela 1 - Cronograma.....	3
Tabela 2 - Vantagens e desvantagens dos contadores de água.	16
Tabela 3 - Características das tecnologias.....	24
Tabela 4 - Vantagens e desvantagens das tecnologias.	25
Tabela 5 - Critérios de inclusão e exclusão de artigos.	29
Tabela 6 - Resumo dos artigos científicos estudados.....	32

Lista de abreviaturas, siglas e acrónimos

3GPP - 3rd Generation Partnership Project

AES - Advanced Encryption Standard

AMI - Advanced Metering Infrastructure

ANF – Águas não faturadas

BS - Base Station

CNNs - Convolutional Neural Networks

CSS - Chirp Spread Spectrum

D-BPSK - Differential Binary Phase-Shift Keying

eDRX - Extended Discontinuous Reception

eNodeB - Evolved Node B

EPC - Enhanced Packet Core

ERSAR - Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos

eUTRAN - Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network

GIRH – Gestão Integrada dos Recursos Hídricos

IA – Inteligência Artificial

IoT – Internet das Coisas

LPWA - Low Power Wide Area

LPWANs – Low Power Wide Area Networks

LTE - Long-Term Evolution

LTE-M - Long-Term Evolution for Machines

MAC - Controlo de Acesso ao Meio

ML - Machine Learning

MQTT - Message Queuing Telemetry Transport

NB-IoT - NarrowBand-Internet of Things

NS - Network Server

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing

ONU – Organização das Nações Unidas

PSM - Power Saving Mode

SMCB - Serviços Municipalizados de Castelo Branco

SMAS - Serviços Municipalizados de Água e Saneamento
UNB - Ultra-NarrowBand

1 Introdução

No capítulo 1, delinea-se o enquadramento temático, estabelece-se a definição do problema e apresentam-se os objetivos que norteiam este projeto. Adicionalmente, justifica-se a relevância da sua realização, sendo este trabalho desenvolvido no contexto do Projeto I da Licenciatura em Engenharia Informática.

1.1 Âmbito

A água é um recurso natural fundamental para o homem, constituindo um fator decisivo e condicionador do desenvolvimento económico e social das populações [1].

No entanto, os sistemas de abastecimento de água enfrentam perdas significativas ao longo das suas redes. Segundo a Entidade Reguladora dos Serviços de Água e Resíduos (ERSAR) cerca de 30% do volume de água captado, tratado e distribuído pelos sistemas de abastecimento não é faturado. Deste modo, não só se desperdiça este recurso precioso, como também se verifica um aumento dos custos operacionais das empresas fornecedoras, comprometendo o fornecimento às populações. Em muitos casos, as ineficiências decorrem da utilização de tecnologias antigas, como contadores mecânicos de água, que apresentam limitações em precisão, deteção de fugas e integração com sistemas de monitorização modernos [2].

Com o avanço das tecnologias, torna-se cada vez mais urgente modernizar o sistema de contagem da água, promovendo a sustentabilidade, a eficiência e a centralização de dados. A adoção de tecnologias inovadoras pode contribuir significativamente para melhorar a gestão de recursos hídricos, minimizar perdas e otimizar a distribuição. A adoção de sensores inteligentes, medidores conectados e a realização de análises preditivas de dados nos serviços de abastecimento são passos importantes para transformar as cidades em 'Smart Cities', com o potencial de transformar a forma como os sistemas de abastecimento são geridos, contribuindo significativamente para minimizar as perdas e otimizar os consumos de água [3].

O projeto sugere o desenvolvimento ou adoção de tecnologias de medição mais eficientes, incluindo medidores inteligentes, sensores avançados e a integração com aplicações que permitam a implementação de um sistema de análise de dados para prever padrões de consumo, identificar anomalias e auxiliar na tomada de decisões para reduzir o desperdício. Assim, o objetivo final é implementar um sistema de medição que seja preciso, acessível e sustentável, promovendo a eficiência no uso dos recursos hídricos.

1.2 Definição do Problema

A crescente população mundial e a concentração nas grandes cidades estão a agravar o problema do stress hídrico, caracterizado pela procura de água por habitante ser superior à capacidade de oferta, tornando o acesso à água doce cada vez mais crítico. A escassez tem vindo a aumentar devido à crescente procura deste recurso essencial pelos setores industrial e doméstico. A água é vista como um bem essencial não só para o saneamento, mas também para a redução de doenças a nível global, a melhoria da saúde, da educação e da produtividade económica das populações. A Organização das Nações Unidas (ONU) estima que, até 2025, 1,8 mil milhões de pessoas enfrentarão escassez absoluta de água [4].

Nesse contexto, o balanço hídrico surge como uma ferramenta fundamental para o planeamento e gestão eficiente dos recursos hídricos, permitindo contabilizar a disponibilidade de água em determinado local e período. No entanto, um dos principais desafios no abastecimento de água, especialmente em ambientes urbanos, são as perdas, sendo as chamadas "águas não faturadas" (ANF) as mais significativas. Estas águas são produzidas de modo a tornarem-se potáveis, no entanto, perdem-se no sistema de distribuição de água e não chegam ao seu destino final. Leva à perda de um recurso importante e escasso, além de, trazer impactos negativos ambientais e financeiros.

Segundo a ERSAR, em 2023, Portugal registou perdas médias de ANF no setor de abastecimento de água de 27,1%, um valor superior ao limite recomendado de 20%. A tecnologia tem contribuído para a melhoria da medição e monitorização do consumo, mas os erros de medição nos contadores, muitas vezes devido a falhas nos equipamentos ou variações no padrão de consumo, continuam a ser uma das principais causas de ANF. Esses erros podem prejudicar a gestão eficiente da água, evidenciando a importância de aprimorar os sistemas de medição e reduzir as perdas no setor. Assim sendo, a adoção de instrumentos tecnologicamente mais avançados permitirá uma redução substancial destas perdas, através de uma gestão e monitorização mais eficazes e eficientes [5].

1.3 Objetivos

Os objetivos do projeto centram-se, em primeiro lugar, na proposta e avaliação de uma solução que melhore a eficácia da gestão e monitorização dos contadores de água dos Serviços Municipalizados de Castelo Branco. Pretende-se, assim, reduzir as perdas de água e minimizar erros de medição, beneficiando tanto a população como a entidade fornecedora. Para tal, é essencial definir etapas intermédias que incluem: (i) a análise do estado da arte e o levantamento das tecnologias utilizadas até à atualidade; (ii) a análise de requisitos e definição da arquitetura do sistema; (iii) a proposta e, caso necessário, a implementação de um protótipo; (iv) a realização de demonstrações e testes funcionais e, por fim, (v) a avaliação de desempenho e validação do protótipo.

Para alcançar os objetivos acima identificados, elaborou-se um cronograma, conforme apresentado na **Tabela 1**, que engloba as seguintes tarefas:

Tarefa 1 – Análise do estado da arte: realizar um estudo aprofundado sobre tecnologias atuais de monitorização e gestão de contadores de água, com foco em medidores inteligentes, sensores conectados e softwares de gestão de dados.

Tarefa 2 – Levantamento tecnológico: Identificar as melhores práticas e soluções tecnológicas existentes no mercado, realizar um levantamento das tecnologias emergentes que podem ser integradas no sistema de Castelo Branco.

Tarefa 3 – Análise de requisitos e definição da arquitetura do sistema: Estudar as necessidades operacionais dos Serviços Municipalizados de Castelo Branco (SMCB), incluindo os requisitos de precisão, conectividade, facilidade de uso e integração com o sistema atual.

Tarefa 4 – Definir a arquitetura do sistema de monitorização, detalhando como os dados serão recolhidos, armazenados e analisados para identificar padrões de consumo e perdas.

Tarefa 5 – Proposta para implementação de um protótipo demonstrador: Planear um protótipo funcional de um sistema de monitorização a desenvolver, utilizando sensores inteligentes e softwares de monitorização em tempo real. Este protótipo deverá ser capaz de monitorizar a pressão, o fluxo e os consumos de água nas redes de distribuição, além de detetar anomalias como fugas e falhas de medição.

Tabela 1 - Cronograma

Ano	2024				2025
	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN
Mês					
Tarefas					
1					
2					
3					
4					
5					

1.4 Organização do Documento

Este documento encontra-se estruturado em 5 capítulos. O capítulo 1 tem como propósito apresentar e contextualizar o trabalho ao leitor. No capítulo 2, o leitor é situado no problema central do projeto: o desperdício dos hidrómetros. De seguida, no capítulo 3, é apresentado o estado da arte, ou seja, os hidrómetros, tecnologias e trabalhos relacionados com o tema em estudo. No capítulo 4, realiza-se a avaliação de desempenho da tecnologia identificada como mais promissora. Por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões deste trabalho, identifica os desafios e discute as perspetivas de continuidade no Projeto II.

2 Estado da Arte

Os hidrómetros, dispositivos utilizados para medir o consumo de água em habitações, empresas e outras instalações, enfrentam problemas como falhas na medição, obsolescência tecnológica e vulnerabilidades à manipulação. Estes problemas têm implicações significativas para a eficiência e sustentabilidade dos recursos. Além disso, afetam diretamente consumidores, empresas e políticas públicas, influenciando o cumprimento de metas globais, como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

A precisão nos sistemas de medição é fundamental para alcançar o ODS 6. Este sexto objetivo de desenvolvimento sustentável visa garantir a disponibilidade e gestão sustentável da água para todos. Contadores defeituosos podem levar ao desperdício de água e dificultar a implementação de políticas eficazes de conservação. Além disso, a redução do consumo de água está diretamente ligada à diminuição de impactos ambientais e à promoção de práticas sustentáveis [5].

A modernização dos sistemas de contagem, incorporando tecnologias avançadas, é essencial para mitigar esses desafios. A implementação de contadores inteligentes permite uma medição mais precisa e transparente, facilitando a gestão eficiente dos recursos e contribuindo para a sustentabilidade ambiental. Além disso, a adoção de tecnologias de ponta pode promover a inovação e infraestrutura resiliente [6].

Abordar os problemas dos contadores é, portanto, um passo essencial para promover o consumo e a produção sustentáveis. A precisão na medição de recursos como água é fundamental para a implementação de práticas sustentáveis e para a redução do desperdício, contribuindo para a conservação ambiental e o bem-estar humano [7].

A **Figura 1** demonstra o progresso dos países na implementação da Gestão Integrada de Recursos Hídricos (GIRH), é visivelmente destacado que a aceleração é necessária para garantir recursos hídricos suficientes e bem geridos para o futuro. A classificação dos países é feita em quatro categorias de progresso: "Limitado", "Moderado", "Próximo da Meta" e "Substancial".

A maior parte dos países está no nível "Limitado" (55 países) e "Moderado" (52 países), o que indica que ainda há grandes desafios a serem superados. Outros 44 países estão "Próximos da Meta", com um progresso significativo, mas ainda sem atingir completamente os objetivos. Apenas 22 países alcançaram um progresso "Substancial", representando o nível mais avançado de implementação.

Estes dados comprovam que a maioria dos países ainda precisa de aumentar as suas ações para atingir as metas globais de gestão sustentável da água. Isto demonstra que muitos países ainda não alcançaram níveis satisfatórios [9].

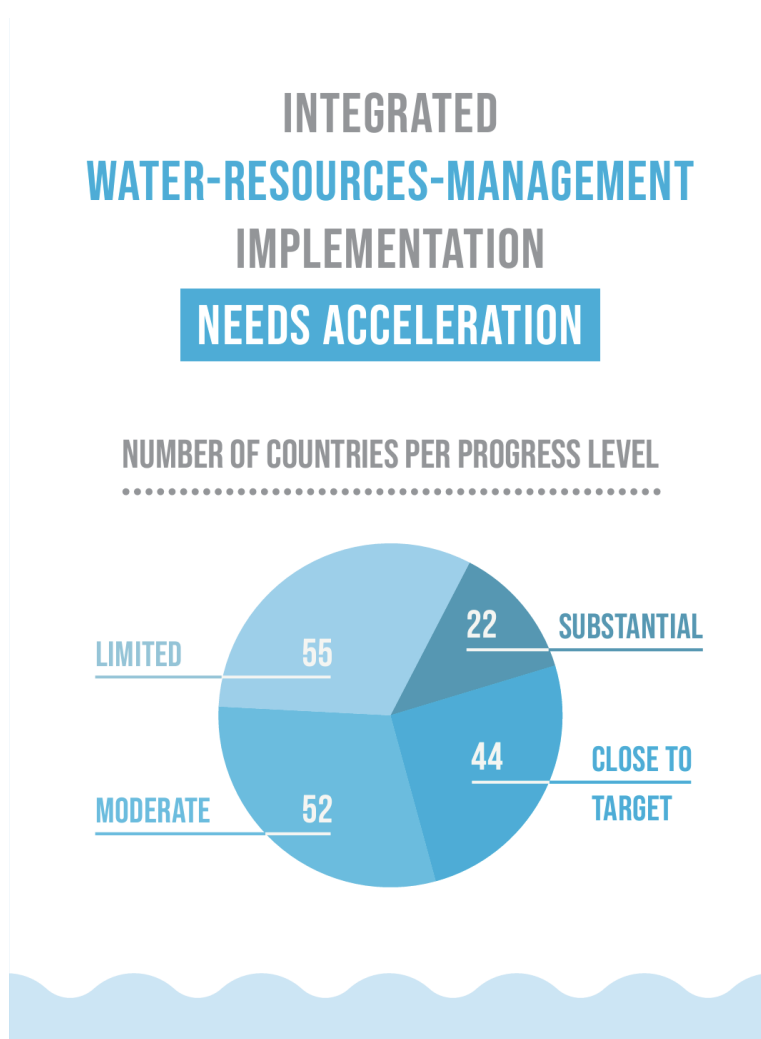


Figura 1 - Garantir a disponibilidade e a gestão sustentável da água potável e do saneamento para todos. Fonte: [8]

2.1 Desperdício que causam os hidrómetros em números

Segundo a ERSAR, como se pode verificar na **Figura 2**, 29,8% da água distribuída nos sistemas de abastecimento em Portugal não é faturada aos utilizadores, o que equivale a milhões de metros cúbicos de água perdidos anualmente [9].

Erros nos hidrómetros, que incluem falhas na medição devido à sua obsolescência, desgaste mecânico e má instalação, estão entre as principais causas das chamadas "perdas aparentes". Os erros nos hidrómetros podem subestimar o consumo real até 10%, dependendo da idade e do estado do equipamento, contribuindo para a contagem irreal do consumo de água. Isso não só representa desperdício de água, mas também perda de receitas para os operadores [10].



Figura 2 - Representação dos dados da ERSAR para perdas de água nacionais. Fonte: [9]

2.2 Custo do Desperdício dos Hidrómetros

Como apresentado anteriormente, os hidrómetros, quando ultrapassam os 12 anos de uso ou quando mal calibrados têm um papel de destaque, já que cerca de 10% do consumo real pode não ser registado adequadamente, dependendo do tipo de hidrómetro instalado.

Assim, municípios com grande consumo, como Lisboa ou Porto, podem perder milhões de metros cúbicos de água anualmente devido a estas falhas [10].

As perdas de água têm um valor estimado de 162 milhões de metros cúbicos em 2022, o que representa uma perda de 83 milhões de euros, segundo dados da ERSAR. Desse total, uma parcela significativa deve-se a falhas de medição e a consumos não registados.

A **Figura 3** apresenta dados referentes ao consumo de água, perdas reais e o total de água tratada entre os anos de 2018 e 2022. Apesar de uma leve melhoria

no desperdício de água ao longo do período observado, com uma redução de 172 milhões de m³ em 2018 para 162 milhões de m³ em 2022, ainda há um caminho significativo a percorrer para alcançar o desperdício mínimo. É essencial a redução destas perdas para melhorar a eficiência dos sistemas de abastecimento e minimizar os impactos económicos e ambientais associados [11].

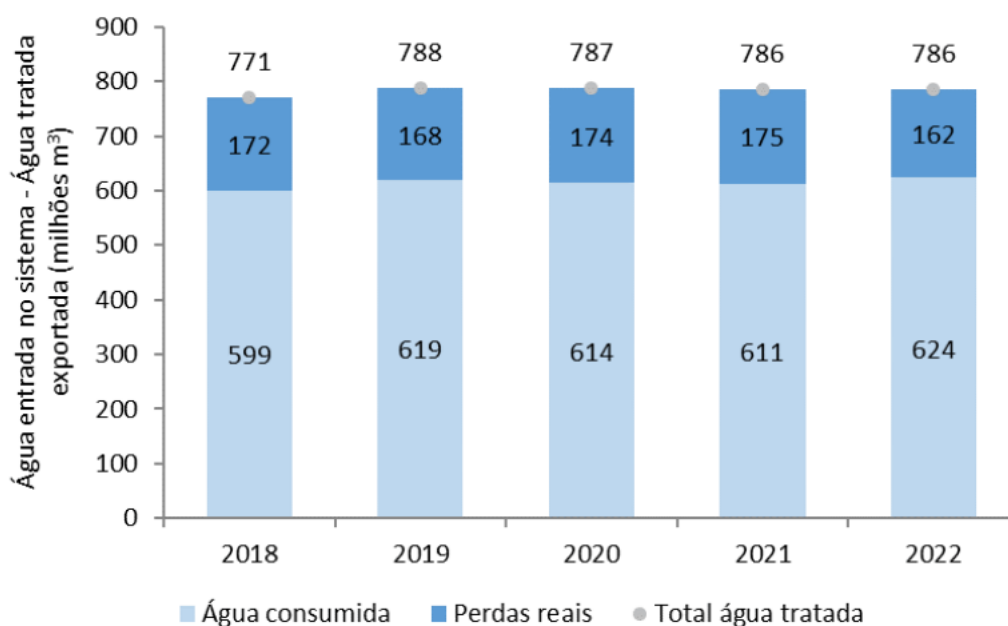


Figura 3 - Evolução das perdas reais no período 2018 - 2022. Fonte: [11]

O custo médio da água faturada em Portugal gira em torno de 1 euro por metro cúbico, uma submedição de 10% em um sistema que distribua 20 milhões de metros cúbicos por ano resulta numa perda financeira de 2 milhões de euros anuais ou mais, dependendo das taxas aplicadas. Embora seja uma pequena parcela dos 83 milhões anuais, esta quantia é frequentemente superior ao investimento necessário para substituir ou modernizar os sistemas de medição [12].

2.3 Tecnologias para Combater o Desperdício dos Hidrómetros

As tecnologias de monitorização e gestão de recursos desempenham um papel central no combate ao desperdício de água, incluindo o uso mais eficiente de hidrómetros. O avanço tecnológico na área de medição e análise de dados permite identificar perdas e promover uma gestão hídrica mais sustentável, um desafio crítico em cenários de escassez de água e onde a utilização deste recurso é cada vez maior.

Os hidrómetros inteligentes, equipados com sensores avançados e conectividade IoT (Internet das Coisas), são cada vez mais uma ferramenta crucial para detetar fugas e reduzir perdas no abastecimento de água. Estes dispositivos

não só têm o objetivo de medir o consumo de água com alta precisão, mas também monitorizar a pressão e os padrões de passagem de água em tempo real, identificando anomalias que podem indicar fugas ou desperdícios. Essa capacidade de deteção precoce é fundamental para reduzir as perdas não visíveis, que muitas vezes representam uma parte significativa do desperdício hídrico.

A **Figura 4** ilustra as diferentes tecnologias, que utilizam uma plataforma em cloud para gerir hidrómetros inteligentes, oferecendo diversas funcionalidades, como controlo remoto, recolha de dados em tempo real, análise de dados, e deteção de fugas. Estão presentes tecnologias de conectividade, como NB-IoT, LoRaWAN e GPRS [13].

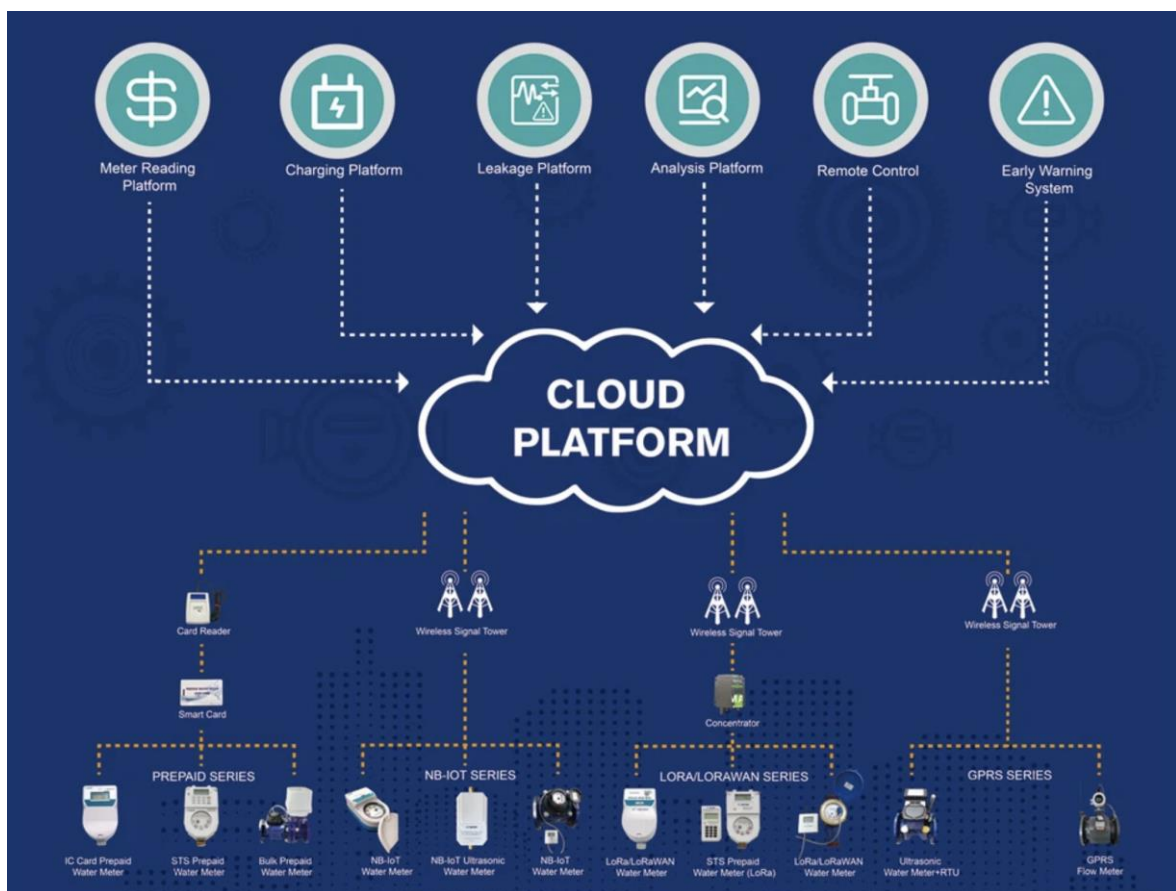


Figura 4 - Diferentes tecnologias aplicadas a hidrómetros. Fonte: [13]

Outro avanço tecnológico importante é o uso de Inteligência Artificial (IA) e Machine Learning (ML) para análise de dados. Os algoritmos de IA podem analisar o comportamento de consumo e detetar padrões incomuns, como variações de consumo em horários ou zonas específicas, que podem indicar problemas nas infraestruturas ou até mesmo a prática de consumos clandestinos [14]. A aplicação de ML também permite a previsão de falhas nos hidrómetros, otimizando a manutenção e reduzindo custos operacionais, como demonstrado por projetos, que integram análise preditiva para melhorar a eficiência da rede [15].

Além da detecção de fugas, os hidrómetros inteligentes também oferecem a possibilidade de otimizar a gestão da água a nível individual e coletivo. A automatização das leituras de consumos, que pode ser feita remotamente e em tempo real, permite a personalização dos preços de acordo com o consumo real. Este tipo de gestão eficiente, através da análise de grandes volumes de dados, não só contribui para a redução do desperdício de água, mas também incentiva comportamentos mais conscientes por parte dos consumidores, que passam a pagar de acordo com o seu uso real [16].

As soluções baseadas em IoT e Big Data também estão a ser implementadas, utilizando IA para otimizar o consumo de água em contextos industriais. A análise de dados de consumo, aliada a uma rede inteligente de hidrómetros, pode resultar numa redução significativa no desperdício de água e na melhoria da gestão dos recursos hídricos [17].

2.4 História dos Serviços Municipalizados de Água de Castelo Branco

A água potável, em virtude do seu elevado custo e da complexidade de obtenção da mesma, tem recebido, ao longo dos séculos, uma atenção meticulosa por parte da humanidade. Tal preocupação justifica-se pela relevância indispensável para a sobrevivência do ser humano, o progresso das civilizações e a preservação dos ecossistemas. A disponibilidade de recursos hídricos de qualidade constitui um pilar essencial para a garantia da saúde pública, o desenvolvimento agrícola e a sustentação das atividades económicas que alicerçam as sociedades [18], [19].

Os Serviços Municipalizados de Castelo Branco (SMCB) foram oficialmente instituídos a 20 de dezembro de 1944, com a finalidade de organizar e gerir, sob um regime industrial, o sistema público de captação, transporte e distribuição de água potável. Anteriormente, o abastecimento hídrico da cidade era marcado por limitações consideráveis, levando a Câmara Municipal, em 1892, a adquirir as nascentes denominadas “Corticeiras” e “Eirinha”, localizadas em Casal da Serra, como passo inicial para a distribuição organizada de água [20].

Em 1934, a aprovação do projeto para a construção da Barragem do Penedo Redondo, concluída no ano seguinte, marcou um progresso significativo, garantindo o fornecimento de água para atender às necessidades crescentes da população durante as décadas subseqüentes. Após a criação dos SMCB, houve a ampliação das infraestruturas, incluindo a construção da Estação Elevatória do Lirião, inaugurada em 1963, e a implementação de sistemas avançados de captação e tratamento de água, como a Barragem do Pisco, associada à Estação de Tratamento de S. Vicente da Beira, concluída em 1968 [20].

O contínuo aumento do consumo de água, impulsionado pelo crescimento populacional e pelo desenvolvimento económico, levou à construção da Barragem de Santa Águeda. Em 1989, esta barragem começou a fornecer água tratada,

permitindo a universalização do abastecimento no município. Posteriormente, em 1987, os SMCB assumiram também a gestão da drenagem de águas residuais, passando a ser denominados Serviços Municipalizados de Água e Saneamento (SMAS). Em 1999, as suas responsabilidades foram ampliadas para incluir a gestão da recolha de resíduos sólidos urbanos [20].

2.5 Tipos de Contadores Existentes

Um contador de água/hidrómetro é um dispositivo de medição projetado para registar e indicar, de forma contínua, o volume de água que o atravessa. Este instrumento constitui o elemento central na relação comercial entre o consumidor e a entidade gestora do serviço de abastecimento de água, pois viabiliza a quantificação precisa do produto fornecido (a água), possibilitando a correspondente faturação do consumo [21].

Em 2007, um contrato de concessão celebrado com a entidade multimunicipal Águas do Centro, S.A. alterou a estrutura de atuação dos SMCB, que passaram a concentrar-se na distribuição de água e na recolha e encaminhamento de efluentes, delegando a captação e o tratamento de água e águas residuais à referida empresa [20].

Atualmente, os SMCB desempenham um papel crucial no fornecimento sustentável de água potável, na drenagem e tratamento de águas residuais, bem como, na gestão de resíduos sólidos urbanos e na limpeza pública, consolidando-se como uma entidade essencial para o bem-estar da população e para a preservação ambiental no concelho de Castelo Branco [22].

A presença do contador de água permite, por um lado, a aplicação do princípio do “consumidor-pagador” e, por outro, promove uma utilização mais consciente e eficiente da água por parte do consumidor, contribuindo de maneira essencial para a conservação desse recurso natural de inestimável valor [21].

Antes de nos aprofundarmos na identificação e análise dos diferentes tipos de contadores, é essencial reconhecer que a sua classificação decorre de uma estrutura metodológica que considera três pilares fundamentais: características construtivas, que abrangem aspetos relacionados aos materiais e ao design; os princípios de funcionamento, que determinam os mecanismos operacionais subjacentes; e a sua capacidade de medição, refere-se à precisão, ao alcance e às condições específicas de aplicação. Esta abordagem permite uma compreensão mais ampla e criteriosa das variáveis que diferenciam cada tipo de contador.

Todos os contadores ou hidrómetros, sob condições normais de operação, incluem, no mínimo, o transdutor de medição, que converte o fluxo de água em dados mensuráveis, o calculador e um dispositivo indicador [23].

Destacamos assim os diferentes tipos de contadores:

- Contadores Volumétricos
- Contadores Velocimétricos
- Contadores Ultrassônicos
- Contadores Eletromagnéticos

Contadores Volumétricos

Os contadores volumétricos representam uma das soluções mais precisas e confiáveis no campo da medição do fluxo de água, sendo amplamente utilizados em aplicações que necessitam alta exatidão e desempenho consistente. Estes tipos de contadores são normalmente usados em ambientes domiciliários [18], [21], [19].

Os contadores volumétricos, podem ser identificados por dois tipos distintos: os modelos de pistão rotativo e os de disco nutante. Apesar de apresentarem uma metodologia de medição semelhante, os mecanismos operacionais que sustentam o funcionamento de cada tipo divergem significativamente. Nos contadores de pistão rotativo, o fluxo de água é segmentado em pequenos volumes fixos, conhecidos como êmbolos, que são contados conforme giram excentricamente dentro de uma câmara cilíndrica. Por outro lado, os contadores de disco nutante possuem uma câmara esférica com um disco interno que oscila à medida que a água passa, sendo o volume consumido registado por um totalizador que contabiliza os movimentos do disco [18], [24], [25].



Figura 5 - Funcionamento de um contador volumétrico. Fonte: [18]

Os contadores volumétricos destacam-se pela superior precisão em relação aos contadores de velocidade, embora apresentem limitações em fluxos extremamente baixos. No que diz respeito à sua construção, esses dispositivos são mais suscetíveis a falhas operacionais causadas por impurezas na água, as quais podem obstruir o mecanismo e interromper o fornecimento. Assim, é fundamental realizar a manutenção periódica e, sempre que possível, instalar filtros para evitar que partículas contaminantes atinjam o contador e provoquem bloqueios [18], [25], [26].

Contadores Velocimétricos

Os contadores velocimétricos constituem uma categoria de dispositivos amplamente utilizada para a medição do fluxo de água, caracterizando-se pela simplicidade construtiva e pela confiabilidade em medições contínuas. Esses medidores são subdivididos em três principais tipos: monojato, multijato e hélice (ou Woltmann), cada um com características específicas que atendem a diferentes necessidades e aplicações [18], [25], [26].

Os contadores multijato foram os primeiros desse grupo a serem desenvolvidos, destacando-se pela robustez e durabilidade. Como se verifica na **Figura 6**, são compostos por uma carcaça metálica e um conjunto de medição que inclui uma turbina, uma câmara de medição, uma placa separadora e um totalizador. O princípio de funcionamento baseia-se na distribuição do fluxo de água em múltiplos jatos, que atingem a turbina de forma simétrica, garantindo estabilidade no funcionamento. A câmara de medição, também denominada câmara velocimétrica, direciona o fluxo de água por meio das tubeiras, garantindo que a saída seja realizada pela parte superior conforme demonstrado na **Figura 7** [18], [25], [26], [27].

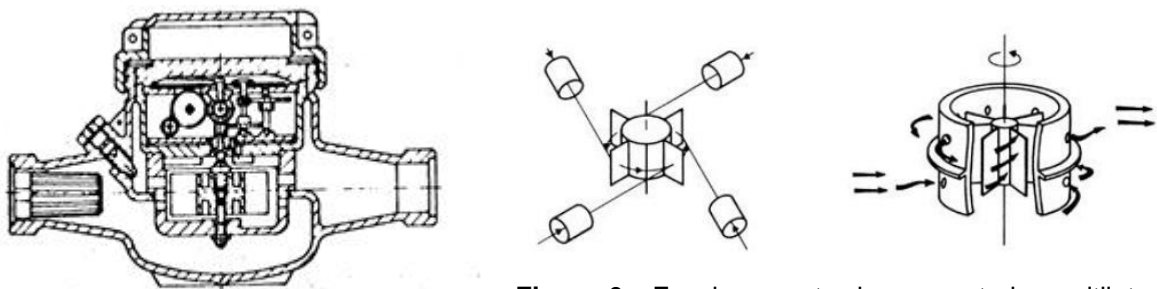


Figura 6 - Funcionamento de um contador multijato. Fonte: [18], [25]

Figura 7 - Funcionamento de um contador volumétrico. Fonte: [18]

Os contadores monojato distinguem-se pela ausência de uma câmara de medição convencional, o que lhes confere uma construção simples e compacta, sendo frequentemente utilizados em ambientes domiciliários. Neste caso, ao contrário do multijato, o contador monojato têm uma turbina onde é incidido um único jato de água sobre a turbina num determinado ponto tangencialmente, como podemos verificar na **Figura 8** [18], [25], [26], [27].

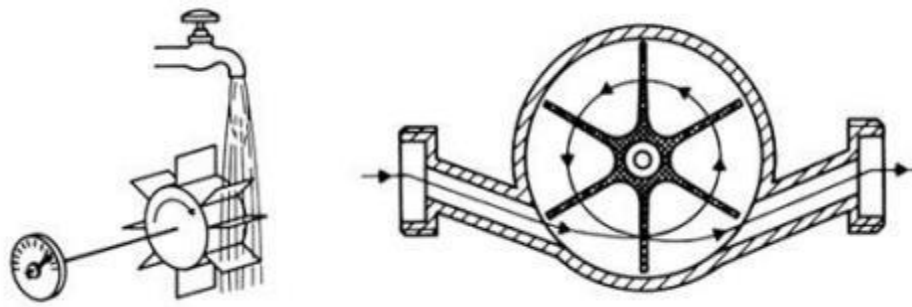


Figura 8 - Funcionamento de um contador monojato. Fonte: [18], [25]

No entanto, essa concepção apresenta uma limitação: a turbina só entra em funcionamento quando o fluxo de água atinge uma velocidade significativa, resultando numa menor precisão para a medição de baixos fluxos de água, especialmente quando é comparada aos contadores volumétricos, que têm maior sensibilidade em fluxos reduzidos [18], [25], [26], [27].

Por último, os contadores Woltmann/hélice são destinados à medição de grandes fluxos de água, frequentemente utilizados para fins industriais ou para controlo e gestão de água em grandes condutas de distribuição [18], [25], [26], [27].

Neste contador, a turbina apresenta a forma de uma hélice como o próprio nome indica. A rotação da hélice depende do fluxo de água que a atinge, das especificações construtivas da própria hélice e do ângulo de incidência do jato sobre as lâminas, conforme demonstrado na **Figura 9** [18], [25], [26], [27].



Figura 9 - Funcionamento de um contador Woltmann. Fonte: [25]

Contadores Ultrassónicos

Os contadores de água ultrassónicos operam sobre o princípio da propagação de ondas ultrassônicas para a medição precisa do fluxo de água. Este dispositivo utiliza transdutores ultrassônicos, que convertem ondas acústicas em sinais elétricos e vice-versa. Por isso, utilizam transdutores posicionados ao longo da tubulação para emitir e receber sinais ultrassónicos como é possível perceber através da **Figura 10**. A medição baseia-se no princípio do "tempo de trânsito" ou "diferença de tempo": a velocidade do fluxo de água altera o tempo que os sinais levam para viajar entre os transdutores, permitindo calcular com precisão o volume de água consumido [28], [29], [30].

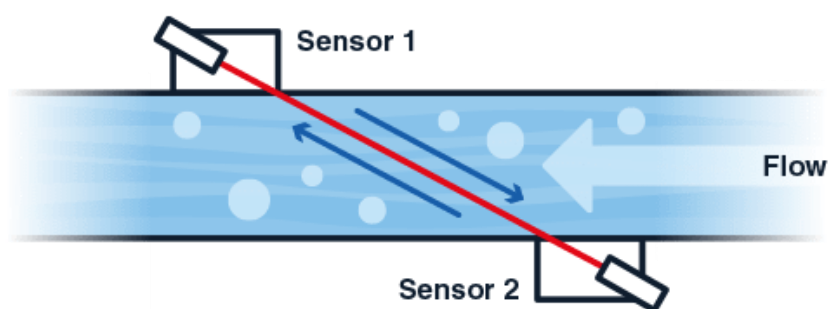


Figura 10 - Funcionamento de um contador Woltmann. Fonte: [28]

Uma característica distintiva dos contadores ultrassónicos é a ausência de componentes mecânicos móveis, o que elimina o desgaste por fricção, aumenta a durabilidade e reduz os custos de manutenção. Além disso, essa tecnologia oferece alta precisão, mesmo em baixos caudais, e não é afetada por fatores como pressão da rede ou qualidade da água, incluindo a presença de partículas suspensas ou incrustações [28], [31].

Outra vantagem significativa é a sua capacidade de integração com sistemas de monitorização e gestão inteligente. Muitos destes contadores são equipados com conectividade para redes IoT ou protocolos de comunicação sem fio, permitindo a monitorização em tempo real e a transmissão de dados para plataformas centralizadas. Esta funcionalidade possibilita a deteção precoce de anomalias, como fugas, e promove a eficiência na gestão dos recursos hídricos [28], [29], [31].

Contadores Eletromagnéticos

Os contadores de água eletromagnéticos utilizam o princípio da indução eletromagnética para medir o fluxo de água condutiva. Quando a água atravessa um campo magnético externo, uma força eletromotriz é induzida no fluido, proporcional à velocidade do fluxo. Essa força é detetada por elétrodos, polos condutores de corrente elétrica, posicionados estrategicamente, permitindo uma medição precisa do volume de água [32].

Por outro lado, em contadores de água que utilizam turbinas com transmissão magnética, o movimento da turbina é transmitido ao mecanismo totalizador por meio de um par de ímanes. O íman propulsor, fixado na ponta do eixo da turbina, aciona o íman propelido, localizado do outro lado de uma placa separadora, permitindo a contabilização do fluxo sem contato direto entre os componentes mecânicos [27].

Além disso, como não possuem partes móveis no interior, esses contadores são altamente resistentes ao desgaste mecânico, assegurando durabilidade e confiabilidade mesmo em condições adversas.

Tabela 2 - Vantagens e desvantagens dos contadores de água.

Contadores	Vantagens	Desvantagens
Volumétricos	<ul style="list-style-type: none"> - Alta exatidão e desempenho na medição do fluxo de água - Frequentemente utilizados em ambientes domiciliares por serem medições de baixo caudal 	<ul style="list-style-type: none"> - Suscetível a falhas operacionais devido a impurezas da água - Necessita de manutenção frequente - Limitações na medição num fluxo de água extremamente reduzido
Velocimétricos	<ul style="list-style-type: none"> - Preço mais barato - Construção Simples - Confiabilidade em medições de fluxos de água contínuos 	<ul style="list-style-type: none"> - Só entra em funcionamento quando o fluxo de água atinge uma certa velocidade
Ultrassônicos	<ul style="list-style-type: none"> - Ausência de componentes mecânicos, elimina os desgastes por fricção - Alta precisão, na medição de fluxos de água - Capacidade de integração com tecnologias IoT 	<ul style="list-style-type: none"> - É caro - Dependência de componentes eletrônicos, neste caso uma bateria.

Eletromagnéticos	<ul style="list-style-type: none"> - Boa durabilidade - Utilizado em ambientes industriais, onde o fluxo de água é elevado - Alta precisão, na medição de fluxos de água - Capacidade de integração com tecnologias IoT 	<ul style="list-style-type: none"> - Manutenção Específica, são necessárias pessoas especializadas na montagem/manutenção do contador - É caro
-------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

2.6 Tecnologias IoT Frequentemente Utilizadas em Hidrómetros

A IoT representa um paradigma em que sensores e atuadores interagem com objetos físicos, conectados por redes com ou sem fios, permitindo-lhes coexistir e interagir de forma contínua e inteligente. Esses objetos ou “coisas” podem transmitir uma quantidade significativa de dados através da rede sem a necessidade de uma interação homem-homem ou homem-computador [33], [34].

O mundo físico está a ser revolucionado ao permitir que objetos, sejam eles físicos ou virtuais, possam ser localizados, monitorizados de forma fluida, de tal forma que torna o mundo como um todo, num vasto sistema de informação interligado [33], [34].

Atualmente, têm sido implementadas cada vez mais medidas para mitigar os desafios associados aos contadores de água. Neste contexto, a utilização de redes IoT surge como uma solução estratégica, permitindo a integração de tecnologias avançadas para otimizar a recolha de dados, identificar anomalias e melhorar a eficiência operacional. As redes IoT mais utilizadas para este fim distinguem-se pelo baixo consumo energético e a facilidade de implementação, sendo adaptadas às diferentes necessidades do setor.

Todas as tecnologias apresentadas a seguir pertencem à categoria das LPWANs (Low Power Wide Area Networks). Estas redes caracterizam-se por oferecerem conectividade de longo alcance e um baixo consumo energético, alcançando tal eficiência através de uma baixa taxa de transmissão de dados e uma latência relativamente elevada, frequentemente na ordem de segundos ou minutos.

Sigfox

A tecnologia Sigfox, foi uma das primeiras a ser instituída na categoria LPWAN, utilizada sobretudo na implementação de redes IoT, esta tecnologia é ideal em cenários onde o volume de dados transmitido, frequentemente de sensores, é reduzido (geralmente variando entre alguns bytes e centenas de kilobytes). Além disso, destaca-se pelo seu amplo alcance operacional, que pode atingir várias

dezenas de quilómetros, e pelo consumo extremamente baixo de corrente, geralmente na ordem de miliamperes ou dezenas de miliamperes por transmissão [35], [36].

O SigFox adota a modulação D-BPSK (Differential Binary Phase-Shift Keying), na qual as mensagens são transmitidas com uma largura de banda fixa de 100 bps. A transmissão ocorre num espectro de frequências não licenciado, inferior a 1 GHz. Esta técnica de modulação insere-se na categoria UNB (Ultra-NarrowBand), distingue-se pelo baixo consumo energético necessário para estabelecer e manter as conexões entre os nós (dispositivos IoT, neste caso) e as estações base (BS) ou gateways [35], [36] como é demonstrado na **Figura 11**.

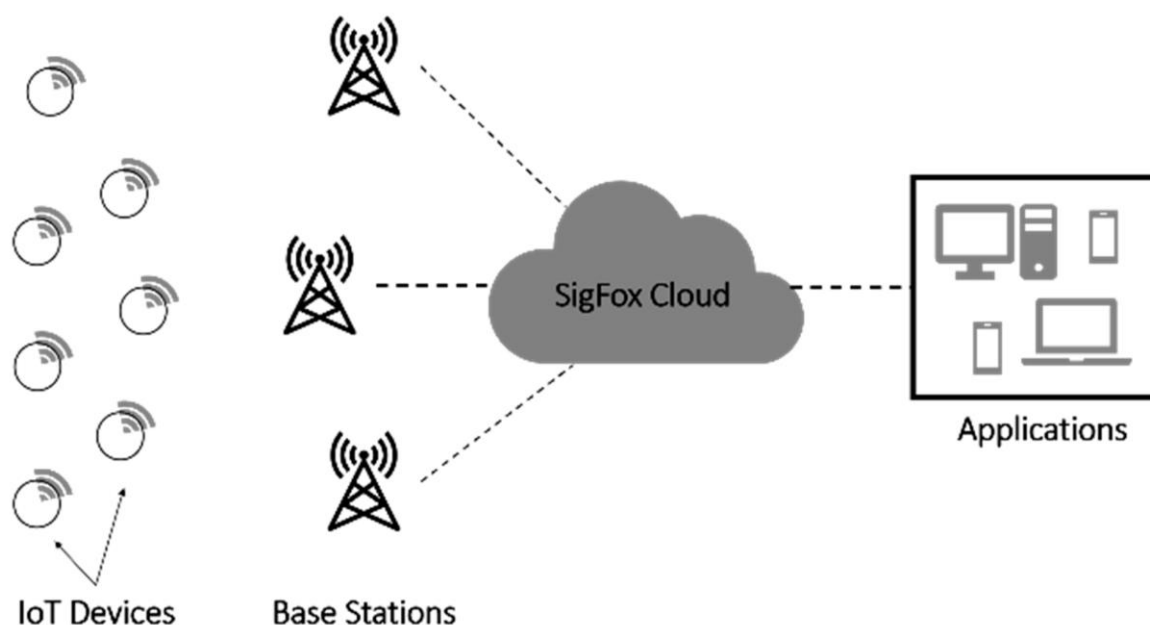


Figura 11 - Demonstração da composição da tecnologia SigFox. Fonte: [35]

Entre as principais vantagens da modulação D-BPSK destaca-se a sua elevada eficiência no acesso ao espectro, bem como a simplicidade de implementação. Adicionalmente, a baixa taxa de bits facilita a utilização de componentes de custo reduzido nos módulos transdutores, tornando esta solução particularmente adequada para aplicações de baixo consumo energético e elevada eficiência espectral [35], [36].

LoRa/LoRaWAN

O LoRaWAN constitui um protocolo da camada de Controlo de Acesso ao Meio (MAC), desenvolvido sobre a base da modulação LoRa. Trata-se de uma camada de software que especifica a forma como os dispositivos utilizam o hardware LoRa, tais como, os momentos de transmissão e a estrutura das mensagens [37], [38].

LoRa é uma técnica avançada de modulação sem fios baseada na tecnologia Chirp Spread Spectrum (CSS). Esta abordagem utiliza pulsos de chirp para codificar informações em ondas de rádio, que utiliza uma técnica semelhante à comunicação natural de golfinhos e morcegos. A modulação LoRa caracteriza-se por ser altamente robusta contra interferências e ruído, o que a torna ideal para ambientes desafiadores e saturados. Além disso, esta técnica permite que as transmissões sejam recebidas de forma confiável a distâncias significativas, oferecendo um equilíbrio notável entre alcance, eficiência energética e resistência a perturbações [37], [38].

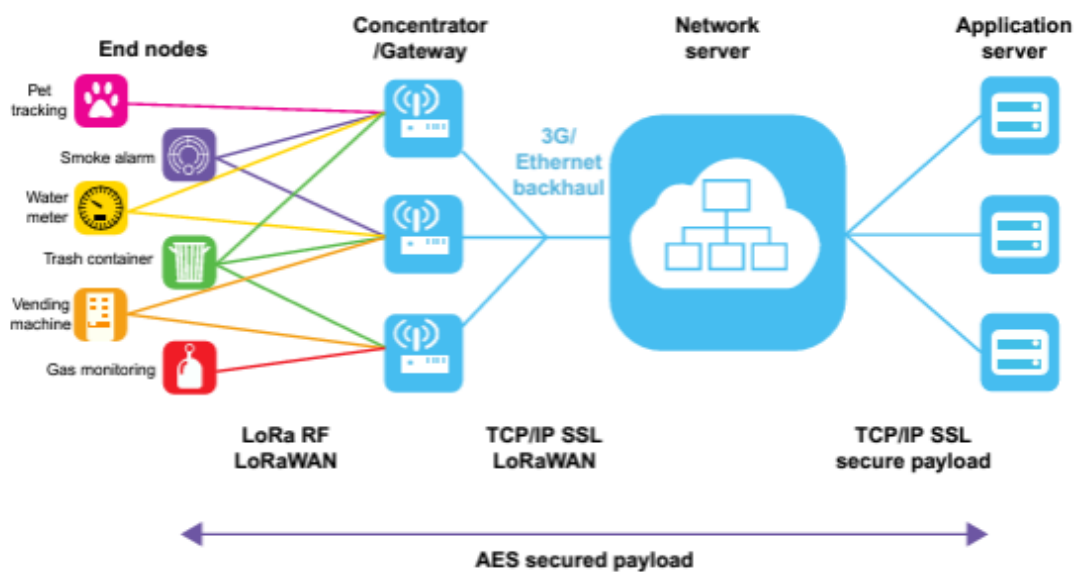


Figura 12 - Estrutura LoRaWAN. Fonte: [38]

Com base na **Figura 12**, é possível notar que as redes LoRaWAN são estruturadas numa topologia estrela-de-estrelas, em que os dispositivos finais, também chamados de endnodes, comunicam diretamente com os gateways utilizando a modulação LoRa. Esses dispositivos recolhem dados do meio físico ou executam funções específicas e enviam-nos para os gateways. Os gateways, por sua vez, atuam como intermediários, retransmitindo os dados recebidos para um servidor de rede (NS) central [37], [38], [39], [40].

O servidor de rede desempenha um papel crucial ao gerir a comunicação dentro da rede. Ele processa os pacotes recebidos dos gateways, descarta os pacotes duplicados (caso um mesmo pacote seja recebido por múltiplos gateways), validando a integridade dos dados e encaminhando-os para o servidor de aplicações correspondente. Este último interpreta os dados processados e disponibiliza informações úteis ou permite a interação com sistemas externos, como

aplicações para monitorização ou controlo, por exemplo, uma dashboard [37], [38], [39], [40].

A comunicação nas redes LoRaWAN é geralmente bidirecional, permitindo o envio de dados dos dispositivos para os servidores (uplink) e a transmissão de comandos ou informações do servidor para os dispositivos (downlink). Contudo, o tráfego ascendente (uplink) é o mais prevalente, devido à natureza típica das aplicações IoT. Um dos pontos fortes desta arquitetura é a possibilidade de os pacotes de dados serem recebidos por múltiplos gateways simultaneamente, o que aumenta a robustez da rede e elimina a necessidade de associações fixas entre dispositivos e gateways [37], [38], [39], [40].

Adicionalmente, a segurança é uma prioridade nas redes LoRaWAN, sendo garantida por encriptação ponta-a-ponta através do Advanced Encryption Standard (AES). Isso assegura a proteção dos dados em todas as etapas da comunicação, desde os dispositivos finais até o servidor de aplicações. Esta arquitetura, combinando robustez, eficiência energética e segurança, torna o LoRaWAN uma das soluções ideais para tornar um contador inteligente [37], [38], [39], [40].

NB-IoT

Com a grande evolução da IoT, o 3rd Generation Partnership Project (3GPP) desenvolveu e normalizou um conjunto de novas tecnologias especificamente direcionadas para LPWANs.

O 3GPP é uma colaboração internacional que reúne diversas organizações com o objetivo de criar normas técnicas globais para comunicações móveis, que abrangem tecnologias como 3G, 4G (LTE) e 5G. O objetivo desta tecnologia consiste em garantir a evolução contínua das redes móveis, abordando as necessidades emergentes, como a expansão da IoT. As normas desenvolvidas pelo 3GPP incluem soluções que permitem comunicações ultra fiáveis e de baixa latência, fundamentais para aplicações críticas, assim como alternativas de baixo custo e baixa potência, adequadas para sensores e dispositivos energeticamente eficientes [41], [42], [38].

Uma das principais características do modelo 3GPP é a sua compatibilidade retroativa, o que possibilita uma integração fluida com infraestruturas e equipamentos mais antigos, enquanto suporta a transição para novas tecnologias. Este modelo cumpre a promessa de estabelecer um ecossistema global e ubíquo de extremo a extremo, capaz de suportar uma crescente diversidade de casos de utilização e de impulsionar a transformação digital à escala mundial [41], [42], [38].

Com o crescimento do número de LPWANs, cada uma com requisitos específicos, tornou-se evidente que nenhuma tecnologia LPWA (Low Power Wide Area) isolada é capaz de satisfazer todas as necessidades das aplicações IoT de baixo consumo energético. Para dar resposta a este desafio, o 3GPP desenvolveu duas tecnologias licenciadas complementares: NB-IoT (Narrowband-Internet of

Things) e o LTE-M (Long-Term Evolution for Machines). Ambas as tecnologias foram construídas com base na tecnologia LTE, o que garante uma elevada compatibilidade com as infraestruturas existentes e uma boa eficiência em diferentes cenários de utilização [41], [42], [38].

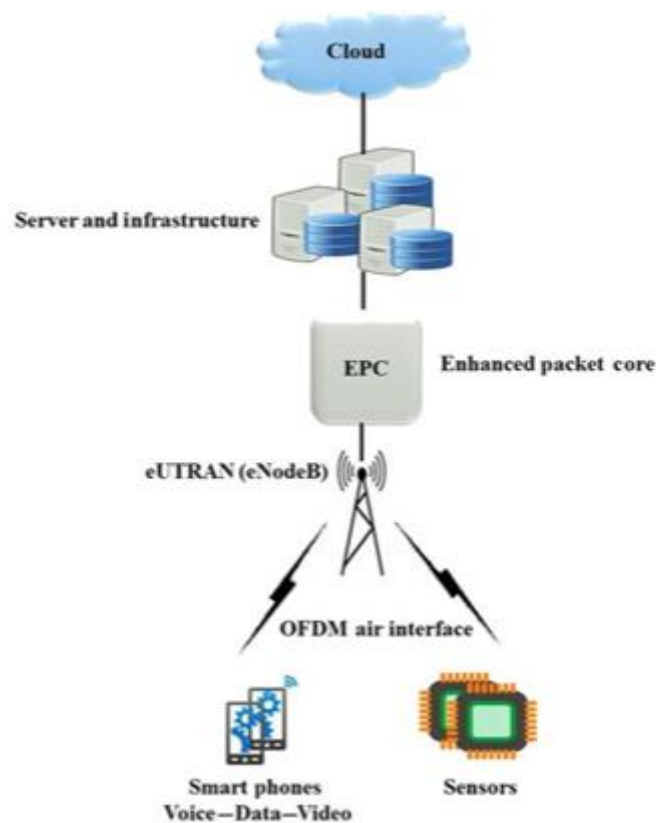


Figura 13 - Estrutura NB-IoT e LTE-M. Fonte: [38]

Segundo a **Figura 13**, é possível identificar que a arquitetura do NB-IoT foi feita para ser uma extensão da infraestrutura LTE, aproveitando as infraestruturas já existentes, ou seja, oferece uma cobertura de rede superior, uma maior duração da bateria e uma grande variedade de dispositivos compatíveis.

O eUTRAN (eNodeB) desempenha um papel fundamental ao fornecer a interface de rádio entre os dispositivos IoT, por exemplo sensores, e a rede central. No NB-IoT, utiliza-se a técnica de modulação OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), uma técnica avançada de transmissão de dados que consiste em dividir um único fluxo de informação em múltiplas frequências, distribuídas por subcanais de banda estreita e espaçados de forma ortogonal [43], [44], [45], [38].

A tecnologia NB-IoT opera nas mesmas bandas de frequência licenciadas utilizadas pela LTE, subdivididas em 12 subcanais, cada um com uma largura de 15 kHz. Esta tecnologia ocupa uma faixa de espectro com uma largura total de 180 kHz, equivalente a um bloco de recursos dentro da transmissão LTE [46], [38].

Este método, em contraste com a utilização de uma única frequência de banda larga, otimiza a eficiência espectral e reduz a interferência entre os subcanais, garantindo assim um aumento significativo da capacidade e eficiência da rede como podemos verificar na **Figura 14** [43], [44], [45], [38].

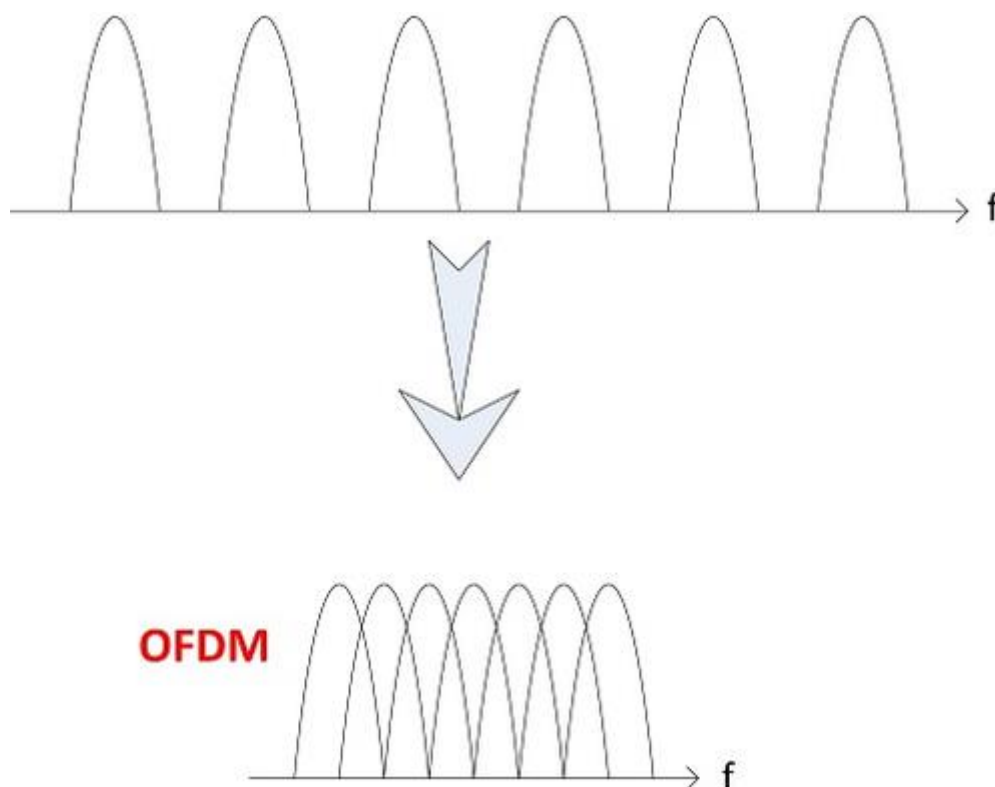


Figura 14 - Demonstração da modulação OFDM. Fonte: [45]

O Enhanced Packet Core (EPC) constitui o núcleo da rede e é responsável pela gestão das funções principais, como a autenticação, o estabelecimento de sessões e o encaminhamento de dados. O NB-IoT reutiliza este componente da arquitetura LTE, assegurando uma integração perfeita com a infraestrutura existente. Esta reutilização não só simplifica a implementação, mas também aumenta a fiabilidade da rede [46], [39], [47], [48], [49], [38].

Na camada superior, o EPC está ligado a servidores e infraestruturas em cloud, onde os dados recolhidos pelos dispositivos IoT são processados, armazenados e analisados. Esta integração facilita a gestão centralizada das aplicações IoT e permite a execução de análises avançadas em tempo real, bem como o armazenamento de grandes volumes de dados para utilização futura [46], [39], [47], [48], [49], [38].

Os dispositivos finais conectados incluem sensores IoT e dispositivos móveis, como smartphones, que comunicam através do OFDM [46], [39], [47], [48], [49], [38].

Na camada superior, a cloud serve como plataforma de integração de dados, permitindo que as informações transmitidas pelos sensores sejam processadas e transformadas em aplicações úteis. Estas aplicações abrangem uma ampla gama de utilizações, como a monitorização ambiental, os contadores inteligentes e a gestão remota de dispositivos [46], [39], [47], [48], [49], [38].

Entre as principais características da arquitetura NB-IoT destaca-se a reutilização da infraestrutura LTE, o que garante segurança e fiabilidade ao operar num espectro licenciado ao contrário do LoRa/LoRaWAN. Além disso, o NB-IoT foi concebido para oferecer baixo consumo energético, ideal para dispositivos que necessitam de baterias de longa duração, e conectividade de longa distância, cobrindo eficientemente áreas rurais e urbanas [46], [39], [47], [48], [49], [38].

LTE-M

A LTE-M, é uma tecnologia de comunicação sem fios desenvolvida especificamente para aplicações IoT, permitindo a reutilização da infraestrutura LTE já existente. Faz parte do conjunto de normas de redes de longa distância de comunicação e baixo consumo de energia (LPWA), definido pelo 3GPP. A LTE-M foi projetada para suportar dispositivos IoT de baixa complexidade, com requisitos de baixo consumo energético, proporcionando uma combinação de eficiência, cobertura alargada e latência reduzida [38], [50], [51].

Esta tecnologia funciona exclusivamente em bandas de frequência licenciadas, assegurando um elevado nível de fiabilidade, segurança e robustez na transmissão de dados. Adicionalmente, destaca-se pela sua eficiência espectral, operando com uma largura de banda reduzida de apenas 1,4 MHz, em contraste com os 20 MHz típicos da LTE convencional [38], [52].

Conforme dito anteriormente, a infraestrutura de rede é a mesma da LTE, apresentada na **Figura 13**.

Como a LTE-M tem um maior volume de dados transmitidos do que a NB-IoT, é necessário maximizar a autonomia energética dos dispositivos IoT, possibilitando que operem até 10 anos utilizando uma única bateria. Este feito é alcançado através de uma arquitetura com um protocolo altamente eficiente e da implementação de avançados modos de suspensão [38], [53], [54], [55].

Entre os principais modos de suspensão destacam-se o Power Saving Mode (PSM), que permite aos dispositivos entrar num estado de suspensão profunda enquanto mantêm a ligação registada à rede, e a extended Discontinuous Reception (eDRX), que possibilita intervalos significativamente mais longos entre os períodos de comunicação com a rede. Estas funcionalidades são cruciais para reduzir o consumo energético, garantindo simultaneamente a conectividade necessária para as aplicações IoT [38], [53], [54], [55].

A tecnologia LTE-M posiciona-se como uma solução robusta, eficiente e versátil no ecossistema da IoT, respondendo às necessidades específicas de dispositivos IoT que requerem comunicações fiáveis e baixo consumo energético. A integração com a infraestrutura LTE existente e a boa eficiência energética tornam-na uma escolha estratégica para tornar um contador inteligente [38], [52].

Tabela 3 - Características das tecnologias.

Característica / Tecnologia	Sigfox	LoRaWAN	NB-IoT	LTE-M
Área de cobertura	<40 Km	<20 Km	<25 Km	5 Km
Técnica de modulação	UNB	Pulsos Chirp	OFDM	OFDM
Taxa de transmissão de dados	100 Bps	50 Kbps	250 Kbps	1 Mbps
Duração da bateria (média)	>10 anos	<10 anos	>10 anos	10 anos
Espetro de frequência	Não licenciado / <1GHz	Não licenciado	Licenciado LTE	Licenciado LTE
Largura de banda de frequência	100 Hz	125-250 kHz	180 Khz	1,4 Mhz

Tabela 4 - Vantagens e desvantagens das tecnologias.

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
Sigfox	<ul style="list-style-type: none"> - Maior área de cobertura, conseguido à custa de uma técnica de modulação mais lenta - Tecnologia simples - Mais barato 	<ul style="list-style-type: none"> - Baixa taxa de transmissão de dados - Espetro de frequência não licenciado - Fraca Segurança, na transmissão de dados
LoRaWAN	<ul style="list-style-type: none"> - Boa segurança, na transmissão de dados - Boa área de cobertura 	<ul style="list-style-type: none"> - Baixa taxa de transmissão de dados - Espetro de frequência não licenciado
NB-IoT	<ul style="list-style-type: none"> - Boa área de cobertura - Boa autonomia da bateria 	<ul style="list-style-type: none"> - Depende muito da infraestrutura de rede LTE - Baixa Mobilidade, ideal para dispositivos IoT estáticos
LTE-M	<ul style="list-style-type: none"> - Ligação direta com a infraestrutura e rede LTE - Alta taxa de transmissão de dados 	<ul style="list-style-type: none"> - Mais caro - Grande consumo de energia

2.7 Tecnologias IoT Utilizadas nos Diversos Continentes

O mercado de LPWANs continua a crescer rapidamente, devido à necessidade crescente de soluções de conectividade IoT que ofereçam baixo consumo energético, ampla cobertura e custos acessíveis. Isto reflete-se no relatório da empresa IoT Analytics, intitulado "5 Things to Know About the LPWAN Market", este relatório apresenta insights detalhados sobre este mercado, que regista mudanças significativas impulsionadas pela adoção tecnológica e novas aplicações [49], [56], [57].

Mediante desafios globais, como as restrições causadas pela pandemia COVID-19 e a escassez global de semicondutores, o mercado de LPWAN apresentou um crescimento sólido [49], [56], [57].

Em 2020, a base instalada global de dispositivos LPWA cresceu cerca de 62%, atingindo 450 milhões de dispositivos ativos. Conforme apresentado na **Figura 15**, em 2021, estimou-se um crescimento adicional de 47%, alcançando 660 milhões de dispositivos distribuídos por diversas regiões. Este aumento sublinha a resiliência e a capacidade de adaptação deste mercado em circunstâncias adversas [49], [56], [57].

Market Snapshot: LPWAN Market 2021

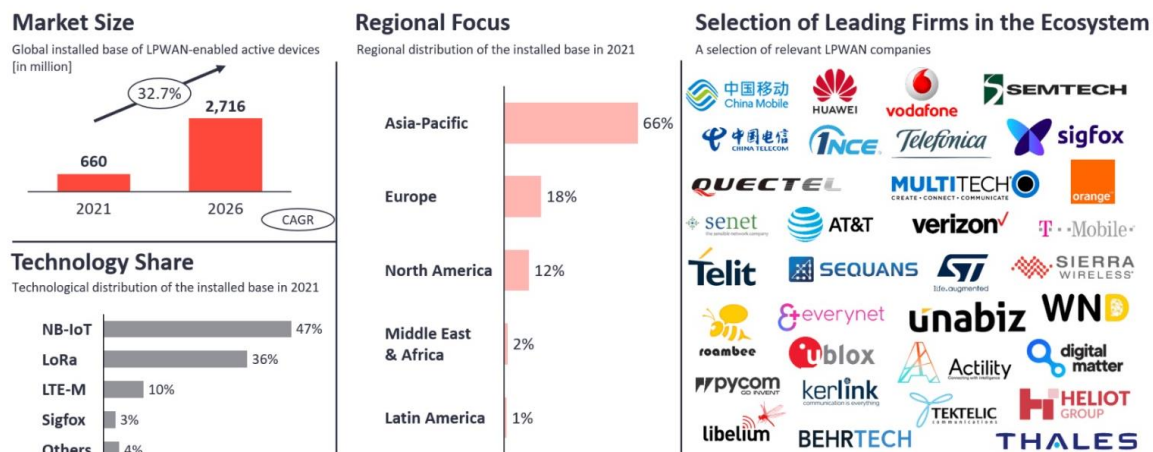


Figura 15 - Visão geral do mercado de LPWANs em 2021. Fonte: [56]

Além disso, a previsão para 2026 aponta para um crescimento ainda mais acentuado, estimado em 2,7 mil milhões de dispositivos, refletindo uma Taxa de Crescimento Anual de cerca de 32,7% [49], [56], [57].

Tecnologias Dominantes

O mercado de LPWANs é atualmente dominado por quatro tecnologias principais, que juntas correspondem a mais de 96% da base instalada globalmente. A NB-IoT lidera com uma participação de 47% em 2021, graças à sua eficiência energética, capacidade de suportar um grande número de dispositivos e ao forte suporte de grandes operadoras, especialmente na China, sendo amplamente adotada em aplicações como a medição inteligente e monitorização remota. Já a LoRa, com 36% do mercado, destaca-se pela sua flexibilidade e conectividade de grande alcance, esta tecnologia é particularmente popular na Europa e América do Norte, onde é amplamente utilizada em iniciativas como a agricultura e cidades inteligentes [49], [56], [57].

A LTE-M, com uma participação de 10% oferece vantagens como suporte à mobilidade e maior largura de banda, características que a tornam ideal para aplicação em áreas como transporte e logística. Por sua vez, o Sigfox, embora detenha uma fatia menor de 3%, continua a ser uma solução atrativa para casos de uso que priorizam simplicidade e baixo custo [49], [56], [57].

As tecnologias emergentes e alternativas híbridas completam por fim o cenário, representando cerca de 4% do mercado e atendendo a necessidades específicas em nichos especializados [49], [56], [57].

Fatores Geográficos e Políticas de Adoção

A China desempenha um papel central no crescimento do mercado de LPWANs, liderando a implementação da tecnologia NB-IoT através de incentivos governamentais e iniciativas de padronização. A região da Ásia-Pacífico, em geral, domina o mercado global, com cerca de 66% da base instalada em 2021, beneficiando de uma ampla adoção em sectores como energia [49], [56], [57].

Europa e América do Norte seguem com 18% e 12%, respetivamente. Na Europa, tecnologias como LoRa e Sigfox são amplamente utilizadas, enquanto na América do Norte há um equilíbrio entre LoRa, LTE-M e NB-IoT. Outras regiões, como América Latina (1%) e Médio Oriente e África (2%), mostram um potencial de crescimento mais lento, principalmente devido a limitações de infraestrutura e adoção tecnológica [49], [56], [57].

Principais Aplicações e Casos de Uso

As LPWANs têm conquistado destaque em diversos setores. São constantemente utilizadas para inovações como a medição inteligente (Smart Metering), que lidera o crescimento nos mercados da China e Europa, onde há necessidade de redes capazes de suportar milhões de dispositivos distribuídos geograficamente. Nas cidades inteligentes, estas tecnologias têm apresentado avanços significativos na monitorização ambiental, iluminação pública e gestão de resíduos. Na agricultura e na indústria, a tecnologia LoRa têm sido amplamente utilizada para monitorizar condições ambientais e otimizar processos em áreas rurais. Já no setor de logística e transporte, as tecnologias LTE-M e NB-IoT disponibilizam a localização em tempo real com uma boa conectividade para veículos e entregas [49], [56], [57].

Consolidação Tecnológica e Competição

Apesar do rápido crescimento, o mercado de LPWANs enfrenta um processo de consolidação tecnológica. A competição entre NB-IoT e LoRa está a moldar o futuro do mercado, enquanto tecnologias como Sigfox estão a perder terreno devido à competição e à adoção limitada em alguns mercados.

Além disso, os esforços de padronização e integração de tecnologias LPWA em arquiteturas IoT maiores (como 5G) são cruciais para impulsionar o mercado e permitir a interoperabilidade entre diferentes dispositivos e redes [49], [56], [57].

3 Análise de Soluções Tecnológicas para Hidrómetros

O capítulo 3 apresenta a análise de soluções tecnológicas para hidrómetros, onde são analisados artigos científicos que contêm informação relacionada com as tecnologias e técnicas utilizadas para deteção, contabilização e envio de dados provenientes de hidrómetros.

3.1 Abordagens em Diferentes Setores do Desperdício dos Hidrómetros e Tecnologias Associadas

Após análise, definiu-se que os setores foco deste estudo sobre o desperdício dos hidrómetros e as suas tecnologias associadas são, o setor Residencial, Comercial e Distribuição.

A pesquisa foi estruturada com base numa procura principal, com a combinação de palavras-chave relacionadas ao desperdício de hidrómetros e às referentes tecnologias que podem ser aplicadas para a sua redução. O foco incluiu inovações tecnológicas, como inteligência artificial (IA), machine learning (ML), Internet das Coisas (IoT), Narrowband-IoT (NB-IoT) e medição inteligente.

Para uma análise mais direcionada, foram adicionados à procura principal termos específicos para cada setor. No setor residencial, foram utilizados os termos "*residential water meters*" e "*household consumption monitoring*", de forma a encontrar estudos sobre medição e monitorização do consumo doméstico. No setor comercial e de distribuição, foram incluídos os termos "*retail water systems*" e "*commercial water networks*", destacando a gestão de hidrómetros em redes comerciais. Estes ajustes permitiram encontrar estudos mais específicos e alinhados aos objetivos do trabalho. Por fim, para realizar a filtragem dos estudos relevantes, foram definidos critérios de inclusão e exclusão de artigos, que se apresentam na **Tabela 5**.

Tabela 5 - Critérios de inclusão e exclusão de artigos.

Critérios de inclusão	Critérios de exclusão
Estudos que abordam a aplicação de tecnologias avançadas na gestão de hidrómetros em diferentes setores.	Estudos que não apresentam análise prática ou aplicação em setores específicos.
Publicações recentes (pós-2010), salvo exceções altamente relevantes.	Trabalhos limitados à descrição de métodos tradicionais de medição.

Os artigos selecionados para uma análise detalhada foram escolhidos com base no título, no resumo e na conclusão. Foram apenas incluídos aqueles que abordam tópicos relevantes e diretamente relacionados ao tema central deste trabalho.

3.2 Setores do Desperdício de Hidrómetros

Esta subsecção apresenta uma descrição detalhada dos diversos trabalhos identificados na etapa anterior, organizados de acordo com os seus respetivos setores.

Residencial

O estudo [58], publicado pela Revista Brasileira de Computação Aplicada, apresenta o desenvolvimento de uma aplicação móvel voltada para a automatização da leitura de hidrómetros em habitações com a utilização de visão computacional. A inovação central do projeto está na aplicação de redes neurais convolucionais (CNNs) para interpretar os valores apresentados nos ecrãs dos medidores de forma automatizada e precisa.

A solução proposta utiliza um sistema de captura de fotografias, onde o utilizador fotografa o visor do hidrómetro com o smartphone. Estas fotografias são processadas por um modelo de aprendizagem profundo que reconhece os dígitos e converte as informações em dados digitais. Estes dados são então armazenados em uma cloud, permitindo o acompanhamento remoto e a realização de análises detalhadas do consumo.

Esta solução prática para utilizadores residenciais, permite a monitorização do consumo de água em tempo real. Além de reduzir os erros associados às leituras manuais, o sistema aumenta a transparência nos dados fornecidos aos consumidores, esta prática promove assim a conscientização sobre o uso eficiente dos recursos hídricos. Por meio da análise dos padrões de consumo, os moradores podem identificar oportunidades para reduzir o desperdício de água nas suas habitações.

O artigo [59], apresentado no Congresso de Iniciação Científica da Unicamp, propõe uma solução voltada para a modernização de hidrómetros destinados a habitações convencionais, a ideia principal é a integração de sensores e a conexão dos mesmos com base nos conceitos de IoT. O sistema é composto por um dispositivo que mede o volume de água consumido e transmite as informações por meio de redes de comunicação para uma plataforma centralizada.

A abordagem combina hardware adaptado para medidores volumétricos tradicionais com redes IoT, permitindo a recolha remota de dados. Isso possibilita tanto aos moradores quanto às empresas fornecedoras de água o acesso a informações em tempo real, favorecendo a gestão mais eficiente do consumo hídrico.

A telemetria aplicada aos hidrómetros residenciais traz benefícios diretos, como a identificação de fugas e a redução de perdas de água ao longo do sistema. Além disso, a conexão com redes IoT proporciona maior confiança nos dados recolhidos, permitindo que os moradores monitorizem o seu consumo de forma detalhada. Esta solução também facilita a integração com sistemas de gestão hídrica mais amplos, o que contribui para o aprimoramento da infraestrutura de abastecimento.

Comércio e distribuição

O estudo [60] analisa os riscos de segurança associados às Infraestruturas de Medição Avançada (AMI) e propõe um Sistema de Prevenção de Intrusões baseado em ML para mitigar ameaças potenciais. A pesquisa destaca a vulnerabilidade das Infraestruturas de Medição Avançada a ciberataques devido à sua interconexão e à falta de recursos computacionais robustos em dispositivos de IoT. A solução proposta visa detetar e prevenir ataques, garantindo a integridade e a confidencialidade dos dados recolhidos pelos medidores inteligentes.

No contexto comercial, onde a monitorização precisa do consumo de água é crucial para operações eficientes, a implementação de AMIs seguras é essencial. A abordagem proposta no artigo pode ser adaptada para proteger redes de medição em ambientes comerciais, prevenindo acessos não autorizados e garantindo a precisão dos dados de consumo.

O presente estudo [61] foca-se nos aspetos de segurança dos medidores inteligentes, especialmente aqueles instalados por consumidores para a monitorização direta do consumo de água. A pesquisa propõe uma configuração de rede e fluxos de dados que ocorreram entre dispositivos para prevenir ataques externos e tentativas de corrupção de dados. Além disso, o estudo avalia a vulnerabilidade desses dispositivos a ataques que contenham algum tipo de malware, propondo mecanismos de deteção e soluções baseadas em técnicas de cooperação.

Em ambientes comerciais, onde múltiplos dispositivos de medição podem ser utilizados para monitorizar diferentes áreas ou processos, a abordagem colaborativa sugerida no artigo pode ser implementada para fortalecer a segurança da rede de medição. Ao estabelecer uma comunicação cooperativa entre os medidores inteligentes, é possível detetar e mitigar ataques de forma mais eficaz, garantindo a integridade dos dados de consumo e a continuidade das operações comerciais.

O artigo [62] posiciona a tecnologia NB-IoT como uma solução de destaque devido à sua infraestrutura equilibrada entre alcance, consumo energético e capacidade de conexão. Diferente de tecnologias como LoRaWAN ou Sigfox, que possuem limitações em aplicações que necessitam de alta conectividade, o NB-IoT suporta um número significativo de dispositivos conectados simultaneamente, tornando-se ideal para redes de sensores em larga escala.

Além disso, a tecnologia apresenta alta eficiência em ambientes urbanos e industriais, oferecendo uma cobertura confiável em locais de difícil acesso, como subsolos e instalações internas. Esta integração com as infraestruturas de telecomunicações já existentes reduz os custos de implementação, um grande fator relevante para operações comerciais e logísticas com a simplicidade de apenas ser necessário inserir um cartão SIM ao dispositivo.

No setor do comércio e distribuição, o NB-IoT traz vantagens práticas importantes, como a monitorização em tempo real, que permite acompanhar dados de consumo à distância e otimizar a distribuição, além de ajudar a diminuir desperdícios. A escalabilidade é outro ponto positivo, já que o NB-IoT consegue gerir uma grande quantidade de dispositivos conectados simultaneamente. Além disso, a eficiência energética torna esta tecnologia perfeita para sensores instalados em locais de difícil acesso, onde a troca frequente de baterias não é fácil de realizar.

Na **Tabela 6** são apresentados todos os estudos acima descritos.

Tabela 6 - Resumo dos artigos científicos estudados.

Referência	Artigo / Estudo	Ano publicação
[58]	Implementação de um aplicativo móvel (App) para leitura de medidores de água e energia baseado em visão computacional.	2020
[59]	Projeto de um sistema para aquisição de dados de medidores volumétricos residências (hidrômetros) com telemetria, aplicando o conceito de IoT.	2019
[60]	Advanced metering infrastructures: Security risks and mitigation.	2020

[61]	Security aspects in smart meters: Analysis and prevention	2020
[62]	Levantamento das tecnologias sem fio para IoT e Indústria 4.0	2022

3.3 Análise Crítica dos Resultados

Os artigos analisados oferecem uma visão abrangente sobre como diferentes tecnologias podem ser aplicadas de forma a reduzir o desperdício em sistemas de hidrómetros, mas também evidenciam lacunas e desafios importantes que precisam de ser considerados. De forma geral, os resultados destacam contribuições significativas no que diz respeito à modernização dos sistemas de medição de água, especialmente por meio da digitalização e automatização. As soluções que utilizam visão computacional e IoT representam avanços claros, promovendo uma maior precisão nas leituras e melhorias na deteção de fugas e desperdícios de forma ágil. A possibilidade de monitorizar o consumo de água em tempo real e remotamente aparece como uma das maiores vantagens destas tecnologias, que oferece uma forma prática e eficiente de otimizar o uso de recursos hídricos.

Além disso, o uso de tecnologias como, NB-IoT contribui significativamente para a conectividade de dispositivos em larga escala, garantindo baixos custos operacionais e eficiência energética. Estas tecnologias mostram-se particularmente relevantes para áreas de difícil acesso ou regiões rurais, onde as soluções convencionais seriam mais difíceis de implementar. Outro aspeto positivo destacado nos artigos é a preocupação com a segurança dos sistemas. A introdução de medidas de proteção, como criptografia e autenticação robusta, assegura que os hidrómetros inteligentes e os dados recolhidos estejam protegidos contra ciberataques ou adulterações. Esta preocupação com a segurança é fundamental para garantir a confiança pública na adoção destas soluções tecnológicas avançadas, seja por parte dos clientes ou das empresas que tenham o interesse de adotar este tipo de serviço. Além disso, a capacidade de envio de dados em tempo real por meio de sistemas conectados possibilita análises preditivas e estratégias de gestão mais eficazes, auxiliando na identificação de padrões de consumo e localização de fugas.

Por outro lado, também foram identificadas algumas limitações e desafios importantes. Um dos principais obstáculos à implementação em larga escala deste tipo de tecnologias é a dependência de uma infraestrutura robusta com uma boa conexão. Em regiões menos desenvolvidas, onde o acesso à internet ou a redes confiáveis é limitado, as soluções propostas podem não ser plenamente eficazes. Outro desafio significativo está relacionado aos custos de implementação e manutenção. Embora tecnologias IoT possam ser eficientes a longo prazo, os custos iniciais para a instalação de dispositivos conectados e a adaptação das infraestruturas existentes podem ser altos, especialmente em regiões que não tenham fundos monetários para este tipo de investimento.

4 Avaliação de Desempenho

Neste capítulo será apresentada a tecnologia NB-IoT, identificada ao longo do estudo do estado da arte como a tecnologia mais promissora para utilização na recolha de dados provenientes de hidrómetros. Em primeiro lugar é descrita a tecnologia escolhida a ser utilizada. Depois, são apresentadas as métricas de desempenho da tecnologia tendo em conta a região em estudo, bem como o cenário de implementação do modelo, o mockup do dashboard e o modelo E/R. Por fim, são discutidos os resultados.

4.1 Apresentação da Tecnologia

A tecnologia NB-IoT (Narrowband Internet of Things) é a solução idealizada para a região em estudo. A tecnologia é moderna e eficiente, projetada para permitir a comunicação entre dispositivos de forma simples e confiável, útil em sistemas de gestão de recursos hídricos, como a recolha de dados de hidrómetros.

Uma das principais vantagens do NB-IoT é o baixo consumo de energia, permitindo que os dispositivos funcionem por longos períodos com baterias, o que é o ponto bastante positivo em termos de manutenção. Esta característica torna a tecnologia não apenas económica, mas também eficiente, especialmente em aplicações de monitorização contínua.

A cobertura é outro ponto forte desta tecnologia. O NB-IoT pode operar numa ampla gama de condições, desde zonas urbanas densas até áreas rurais, como é o caso das zonas adjacentes de Castelo Branco. Esta flexibilidade garante que dispositivos, como os hidrómetros, possam recolher e transmitir dados de maneira eficiente, mesmo em regiões com infraestruturas de rede mais limitadas.

4.2 Métricas de Desempenho

A modernização dos sistemas de gestão de recursos hídricos exige cada vez mais a utilização de tecnologias avançadas, como o NB-IoT. Esta tecnologia permite a comunicação eficiente dos dispositivos, sendo ideal para a recolha de dados de hidrómetros, pois consome pouca energia e utiliza uma baixa largura de banda.

A **Figura 16** apresenta a cobertura de rede 4G com os diferentes níveis de Mbps na região de Castelo Branco, que é marcada por limites a vermelho. Este estudo é importante para avaliar se é viável implementar a tecnologia NB-IoT para a recolha de dados de hidrómetros. A tecnologia NB-IoT precisa de uma boa infraestrutura de conectividade e, por esse motivo, este estudo de cobertura fornece informações relevantes para inferir como são as condições na região de Castelo Branco. Esta

análise foi realizada com o apoio de uma ferramenta inovadora da ANACOM disponível em [63].

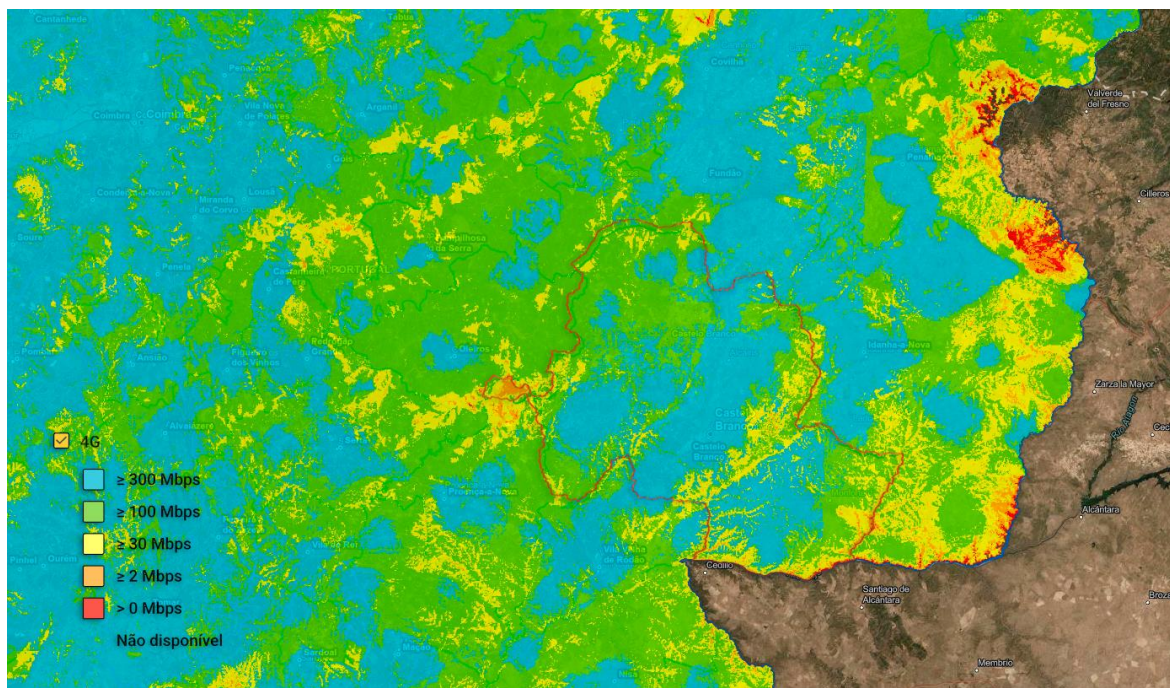


Figura 16 - Desempenho da cobertura de rede 4G na região de Castelo Branco.

As áreas representadas a azul indicam uma infraestrutura de alto desempenho, com valores superiores ou iguais a 300 Mbps, capaz de suportar, de forma eficiente, dispositivos que necessitem de conectividade estável e rápida. Estas zonas abrangem grande parte da região urbana e das adjacentes de Castelo Branco. Por outro lado, as áreas marcadas a verde refletem uma conectividade intermediária, entre 300 Mbps a 100Mbps. Embora a velocidade seja inferior à das zonas a azul, estas regiões ainda apresentam estabilidade adequada para suportar as comunicações necessárias à transmissão de dados dos dispositivos NB-IoT.

As áreas representadas a amarelo apresentam uma conectividade mais limitada, mas que ainda permite facilmente o desenvolvimento deste tipo de soluções. A tecnologia Narrowband foi desenvolvida para ser eficiente mesmo em redes com baixa largura de banda. Assim, mesmo nas áreas a laranja que indicam uma conectividade mínima, entre 30 Mbps a 2 Mbps, continua a ser possível a implementação desta tecnologia com a baixa largura de banda existente. Já nas regiões a vermelho, a implementação direta da tecnologia NB-IoT pode apresentar desafios, onde a largura de banda é extremamente baixa ou até mesmo inexistente.

Com a análise detalhada do mapa, confirma-se que a região de Castelo Branco possui, de forma geral, uma cobertura de rede 4G robusta e consistente. Este cenário é favorável para a implementação da tecnologia NB-IoT, permitindo uma comunicação confiável e eficiente para a recolha automatizada de dados provenientes dos hidrómetros.

4.3 Cenário de Implementação

A arquitetura demonstrada na **Figura 17** funciona de forma estruturada, em que cada componente desempenha um papel essencial. O dispositivo NB-IoT, localizado na casa, é responsável por recolher os dados dos sensores (ex.: ultrassónicos) e transmiti-los para a torre por meio de conectividade NB-IoT. A torre terá a funcionalidade de redirecionar os dados para a Azure Cloud utilizando a infraestrutura da operadora e a internet.

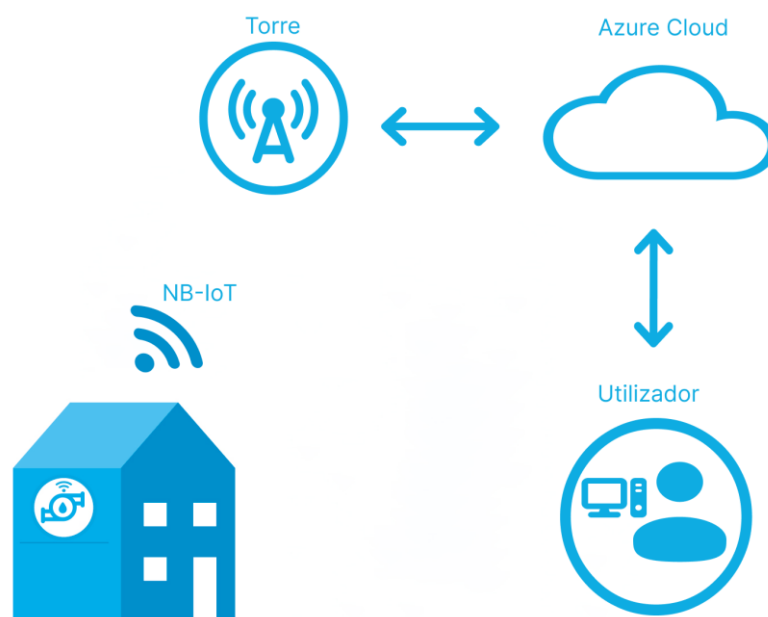


Figura 17 - Cenário de implementação da tecnologia NB-IoT.

Na plataforma Azure Cloud, o serviço principal para receção e gestão dos dados é o Azure IoT Hub. Este vai atuar como um gateway, mas integrado no serviço do Azure Cloud, assim recebe os dados enviados pelo dispositivo NB-IoT, os dados são processados e disponibilizados para outros serviços da cloud. Estes dados podem ser armazenados em bases de dados como o Azure Blob Storage ou o Azure SQL Database, processados em tempo real utilizando o Azure Stream Analytics e, opcionalmente, encaminhados para outros serviços como APIs ou dashboards.

Os dados armazenados e processados na Azure Cloud são então disponibilizados ao utilizador. Isto pode ser feito por meio de uma aplicação para desktop ou smartphone, que obtém os dados utilizando APIs REST fornecidas pelo Azure App Service, ou diretamente em dashboards interativos criados com ferramentas como o Power BI. Além disso, serviços como Azure Functions podem ser configurados para emitir notificações ou alertas para o utilizador em situações específicas, como valores fora de um limite aceitável.

O fluxo geral da comunicação ocorre da seguinte forma: os dados são direcionados do dispositivo NB-IoT para a torre. Em seguida, a informação é transmitida para a Azure Cloud por meio de protocolos como MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) ou HTTP/HTTPS. Por fim, os dados são disponibilizados ao utilizador por meio de aplicações web, dispositivos móveis ou programas de monitorização personalizados, utilizando o protocolo bidirecional WebSockets. Isto permite acesso em tempo real ou quase em tempo real, além de possibilitar a receção de alertas de forma prática.

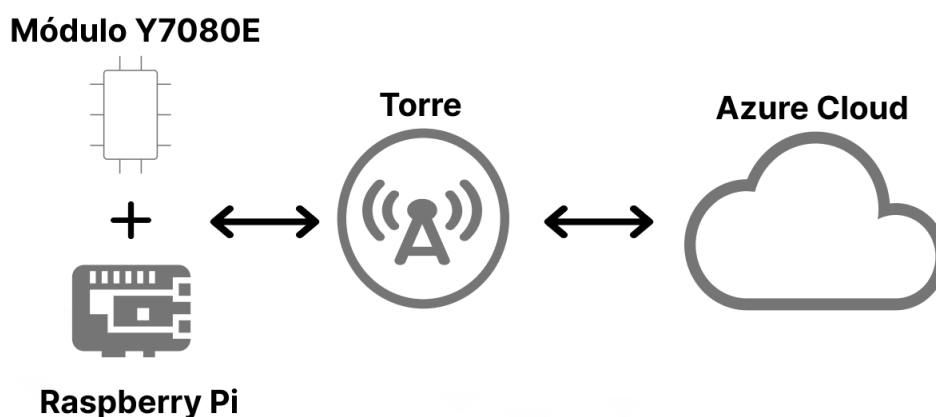


Figura 18 - Elementos necessários para a implementação da tecnologia NB-IoT.

Como é possível visualizar na **Figura 18**, a implementação requer hardware como o Raspberry Pi, o módulo NB-IoT (ex.: Y7080E), além da conexão da rede NB-IoT. Do lado da nuvem, a configuração envolve serviços do Azure como IoT Hub, Stream Analytics, App Service e ferramentas de armazenamento.

4.4 Mockup do Dashboard

O dashboard apresentado na **Figura 19** faz parte da plataforma idealizada para a gestão de dados relacionados à monitorização de hidrómetros e administração de utilizadores. Este dashboard foi projetado para fornecer informações claras e organizadas sobre o sistema, permitindo acesso rápido às suas principais funcionalidades e indicadores.

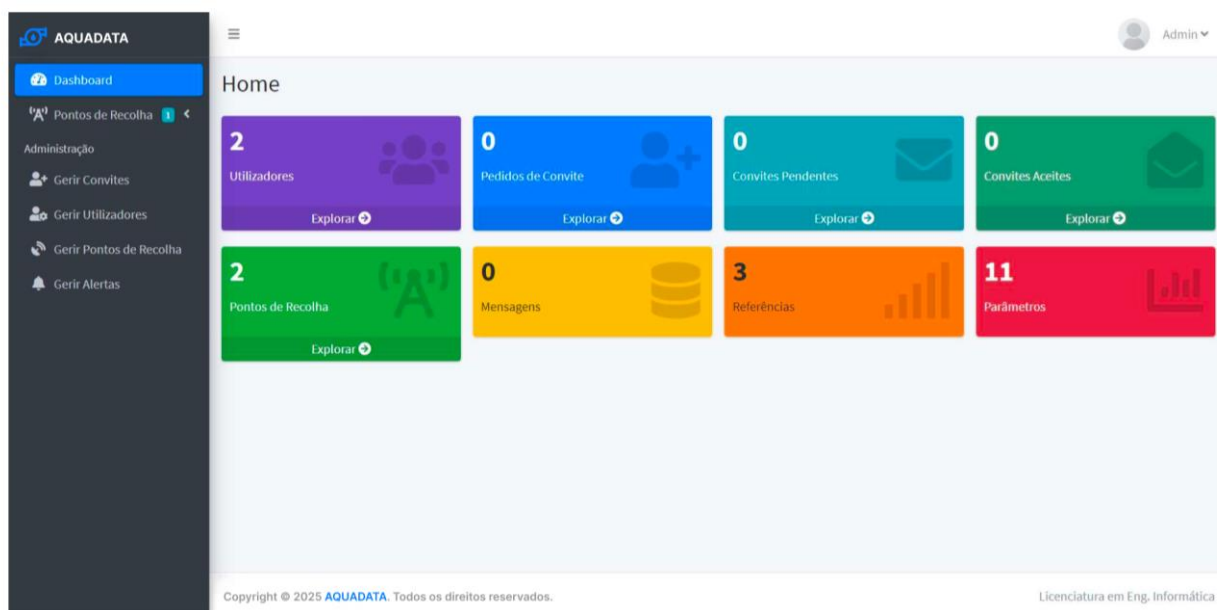


Figura 19 - Mockup do dashboard.

No menu lateral, localizado à esquerda, o utilizador encontra opções para navegar por diversas seções do sistema. As opções integradas são o Dashboard, que apresenta uma visão geral do sistema, e ferramentas para a gestão, como Pontos de Recolha, Gerir Convites, Gerir Utilizadores, Gerir Pontos de Recolha e Gerir Alertas. Este menu centraliza o controlo de dados e configurações, facilitando a administração e operação da plataforma.

O painel principal, ao centro, exibe blocos com os indicadores importantes. Estes incluem o número total de utilizadores registados, pedidos de convite pendentes ou aceites, pontos de recolha configurados, mensagens e alertas, além de referências e parâmetros monitorizados.

Na parte superior direita, está a área de perfil do utilizador. Neste caso, o utilizador identificado é um administrador, que pode aceder a configurações pessoais ou do sistema.

O objetivo principal deste dashboard é fornecer uma visão simplificada e acessível do sistema, permitindo que o utilizador visualize o desempenho e os dados monitorizados. O administrador poderá administrar a plataforma de maneira eficiente e centralizada. A interface é amigável e os indicadores destacados tornam a gestão da plataforma mais prática e eficiente tanto para os administradores como os utilizadores.

4.5 Modelo E/R

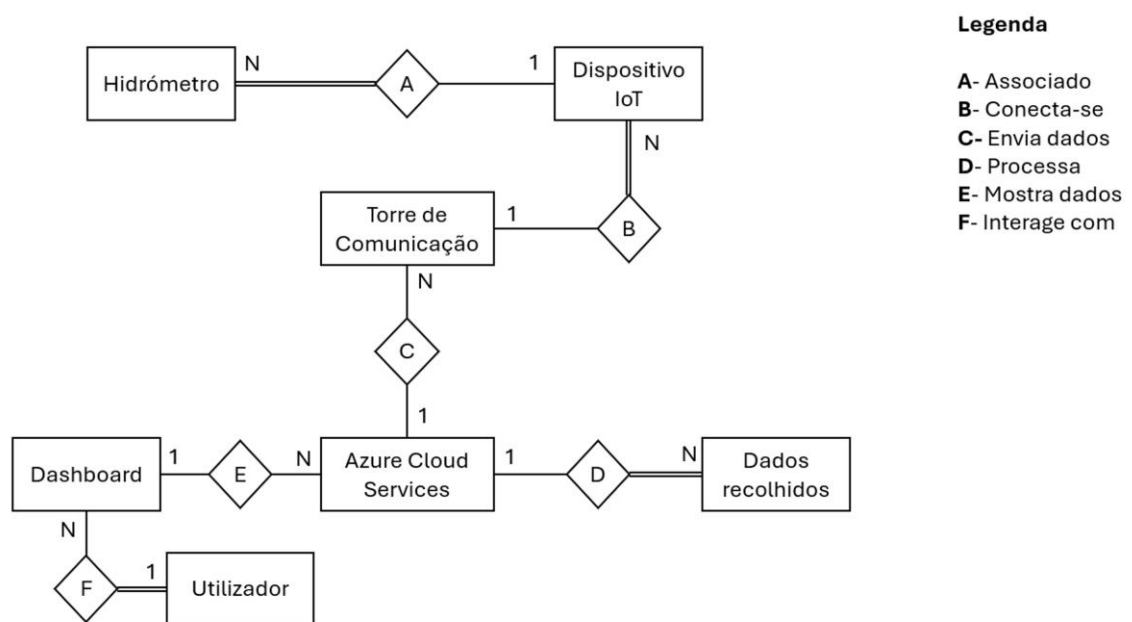


Figura 20 - Modelo E/R.

O modelo Entidade-Relacionamento (E/R) acima representa a arquitetura de um sistema NB-IoT para recolha, processamento e visualização de dados de hidrómetros, conforme descrito na implementação proposta.

Entidades Principais

1. Hidrómetro
2. Dispositivo IoT
3. Torre de Comunicação
4. Azure Cloud Services
5. Dados Recolhidos
6. Dashboard
7. Utilizador

Relacionamentos

A - Associado

O relacionamento entre Hidrómetro e Dispositivo IoT indica que um dispositivo IoT pode estar associado a múltiplos hidrómetros (relação N:1).

B - Conecta-se

Define a ligação entre o Dispositivo IoT e a Torre de Comunicação, onde vários dispositivos IoT podem conectar-se a uma única torre (relação N:1).

C - Envia Dados

Representa o fluxo de dados entre a Torre de Comunicação e os Azure Cloud Services, onde várias torres podem enviar dados para a nuvem (relação N:1).

D - Processa

Relaciona os Azure Cloud Services aos Dados Recolhidos, onde os dados são processados e armazenados. Uma única instância de serviço na nuvem pode processar vários conjuntos de dados (relação 1:N).

E - Mostra Dados

Relaciona os Azure Cloud Services ao Dashboard, onde os dados processados são apresentados de forma visual. Um serviço na nuvem pode alimentar múltiplas dashboards (relação N:1).

F - Interage com

Relaciona o Utilizador com o Dashboard, permitindo que o utilizador visualize e interaja com os dados apresentados. Um utilizador pode interagir com múltiplas dashboards (relação 1:N).

4.6 Resultados e Discussão

A análise confirma que a implementação da tecnologia NB-IoT, na região de Castelo Branco, é técnica e operacionalmente viável, mesmo em cenários de conectividade menos favoráveis. Os dados recolhidos podem ser utilizados não apenas para monitorização em tempo real, mas também para gerar insights valiosos, como padrões de consumo, identificação de situações anómalas e emissão de alertas em situações críticas. O uso de serviços como o Azure Functions para a automatização de notificações potencializa ainda mais a utilidade da solução.

Em termos de hardware, a combinação de dispositivos como o Raspberry Pi, sensores de precisão e módulos NB-IoT, como o Y7080E, oferece uma boa base tecnológica sólida e acessível. Isto reforça que, além de eficiente, o sistema proposto também é escalável e adaptável a diferentes cenários, caso seja também

de interesse, o relacionamento com a tecnologia LoRa. No âmbito da gestão hídrica, esta modernização permite um maior controle e eficiência na alocação dos recursos, isto contribui para a redução de desperdícios e promove a sustentabilidade.

Foi possível aplicar uma análise teórica de que a tecnologia NB-IoT pode ser ampliada para outros contextos e regiões, dependendo apenas de análises específicas da infraestrutura de conectividade e requisitos de dados. Esta abordagem tem em conta a região de Castelo Branco como modelo de referência, comprovando que soluções tecnológicas avançadas podem ser implementadas, mesmo em áreas com menor largura de banda.

5 Conclusões e Trabalho Futuro

No presente capítulo são descritas as conclusões resultantes da realização do projeto assim como propostas futuras do trabalho apresentado. Primeiramente são sintetizados os principais resultados obtidos no decorrer do projeto. Por fim, são propostas medidas futuras, tais como, a implementação da tecnologia em cenários futuros e realistas, a integração com outras soluções de IoT e a análise do impacto de novas evoluções tecnológicas no desempenho do modelo proposto.

5.1 Conclusões

O combate ao desperdício de água não é apenas uma questão de eficiência operacional, mas um compromisso essencial para a sustentabilidade e a preservação dos recursos naturais. Diante dos desafios crescentes, relacionados à escassez hídrica e à ineficiência na medição do consumo, torna-se imperativo adotar soluções inovadoras que garantam maior precisão, controle e otimização do uso da água.

Este trabalho representa um passo na modernização dos sistemas de medição, destacando o potencial das tecnologias emergentes, como a IoT e a tecnologia NB-IoT, para transformar a gestão hídrica. O projeto apresentou um enquadramento teórico sólido sobre o desperdício de água e as suas causas, além de um levantamento abrangente do estado da arte, analisando as soluções já existentes. A escolha do NB-IoT, como tecnologia principal, foi fundamentada com base na sua eficiência energética, baixo custo operacional e viabilidade para a implementação em grande escala, especialmente em regiões com infraestrutura limitada.

Os principais contributos deste projeto incluem a definição clara do problema do desperdício de água, a proposta de um cenário de implementação inteligente para a monitorização remota de hidrómetros, a avaliação da viabilidade da tecnologia NB-IoT na região de Castelo Branco, a realização de um mockup de um dashboard interativo para a gestão eficiente dos dados recolhidos e a construção do modelo E/R para estruturar de forma lógica e visual uma base de dados. Além disso, foram discutidos os desafios da implementação, como questões de conectividade, bem como, as oportunidades futuras que podem impulsionar ainda mais a adoção dessas tecnologias.

5.2 Desafios e Trabalho Futuro

A avaliação do desempenho da tecnologia NB-IoT na recolha de dados de hidrómetros revelou um conjunto de desafios que deverão ser abordados no futuro desta implementação.

Durante a fase de implementação do sistema, podem surgir desafios relacionados com a integração dos dispositivos NB-IoT com a infraestrutura de comunicação existente. A compatibilidade dos módulos NB-IoT (como o Y7080E) com diferentes operadoras e configurações de rede precisará de ser avaliada. O mesmo aplica-se ao cartão SIM a ser aplicado no dispositivo IoT, terá de ser um SIM dedicado para funcionar com a tecnologia NB-IoT, garantindo que a solução funcione de maneira robusta e confiável. Para que aspetos como a autonomia energética dos dispositivos e a eficiência da transmissão de dados em condições adversas, funcionem corretamente.

A integração do sistema com a plataforma Azure Cloud e com a plataforma de monitorização a desenvolver também apresenta desafios. Além disso, a usabilidade do mockup do dashboard projetado precisará de ser validada junto dos utilizadores, neste caso os SMCB, garantindo que a interface seja intuitiva e funcional. A adaptação do dashboard para diferentes dispositivos, como desktops e smartphones, será um fator crítico para garantir a adoção e eficácia do sistema.

No que diz respeito às oportunidades, o projeto permite explorar o impacto da tecnologia NB-IoT na gestão inteligente de recursos hídricos. A modernização do sistema de recolha de dados de hidrómetros poderá contribuir para a otimização do consumo de água, redução de desperdícios e deteção de anomalias em tempo real. A correlação dos dados recolhidos com outras fontes de informação permitirá uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos, podendo inclusive servir de base para futuras pesquisas e expansões da tecnologia para outras regiões.

Para aprimorar ainda mais a solução, será fundamental testar a viabilidade de outras tecnologias complementares, como o LoRa, que pode oferecer benefícios adicionais em regiões de conectividade reduzida. Também poderá ser explorada a implementação de soluções de edge computing para reduzir a latência na transmissão de dados e aliviar a carga sobre a infraestrutura de cloud.

Com base nos resultados observados, pretende-se continuar a desenvolver e otimizar a solução, com o objetivo de garantir um sistema de monitorização hídrica eficiente, preciso e adaptado às necessidades da região estudada. A expansão da solução para novas aplicações e contextos poderá consolidar a tecnologia NB-IoT como um pilar fundamental na modernização da gestão de recursos hídricos.

Referências Bibliográficas

- [1] Branco, António Jorge de Carvalho Lourenço, “Novos paradigmas para a gestão da água e dos serviços de água e saneamento: o caso de Portugal,” Universidade de Lisboa, Portugal, 2007.
- [2] J. S. C. Carvalho, “Fugas e perdas em sistemas de abastecimento de água,” MS thesis, 2019.
- [3] P. Chaveiro, R. António and N. Carriço, “Smart Metering no Combate às Perdas Aparentes–Caso De Estudo De São Pedro Do Corval, Reguengos De Monsaraz”.
- [4] “Crise hídrica global lança países em busca por novas fontes de água,” ONU News, 19 Janeiro 2024. [Online]. Available: <https://news.un.org/pt/story/2024/01/1826487>. [Accessed 22 Dezembro 2024].
- [5] N. Schio, “Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e as empresas participantes do mercado acionário brasileiro,” in *USP Internacional Conference in Accounting*, 2019.
- [6] Superior, Faculdades e Instituições de Ensino, e E. Terciárias, “Acelerando a Educação para os ODS nas Universidades”.
- [7] “Produção e Consumo Sustentáveis,” ODS - BCSD Portugal, [Online]. Available: <https://ods.pt/objectivos/12-producao-e-consumo-sustentaveis/>. [Accessed 25 Dezembro 2024].
- [8] “Goal 6: Clean Water and Sanitation,” United Nations Sustainable Development Goals, [Online]. Available: <https://sdgs.un.org/goals/goal6>. [Accessed 25 Dezembro 2024].
- [9] S. C. A. da Silva, “Implementação de medidas de controlo de perdas de água em sistemas urbanos de abastecimento,” MS thesis. Universidade de Coimbra, Portugal, 2018.
- [10] S. d. O. Martinho, “Perdas em sistemas de abastecimento de água: INOVA-Cantanhede,” 2013.
- [11] “Relatório Anual dos Serviços de Águas e Resíduos em Portugal | 2023,” ERSAR, [Online]. Available: <https://www.ersar.pt/pt/site-publicacoes/Paginas/edicoes-anuais-do-RASARP.aspx>. [Accessed 25 Dezembro 2024].

- [12] F. Vieira de Luca, “Ensaio e Modelagem Aplicados à Previsibilidade do Desempenho de Hidrômetros,” Dissertação de Pós-Graduação, UDESC, 2022.
- [13] “Como escolher um medidor de água inteligente,” Swater Meters, 2024. [Online]. Available: <https://pt.swatermeters.com/info/how-to-choose-a-smart-water-meter-88779998.html>. [Accessed 25 Dezembro 2024].
- [14] D. I. and A. Cominola, “Estimating irregular water demands with physics-informed machine learning to inform leakage detection,” arXiv preprint arXiv:2309.02935, 2023.
- [15] J. G. R. Vanderlei, “Análise de dados comerciais para gestão de perdas de água e detecção de fraudes no município de Vitória de Santo Antão,” 2023.
- [16] A. D. Gupta, “Smart water technology for efficient water resource management: A review,” *Energies* 13.23 (2020): 6268.
- [17] I. F. D. Russo, “O Impacto da Inteligência Artificial na Sustentabilidade Ambiental: Uma Agricultura Sustentável,” MS thesis. Universidade de Lisboa, Portugal, 2020.
- [18] J. M. P. Colarejo, “Contadores de Água algumas considerações técnico-económicas da sua utilização na contagem,” in *IV Jornadas Técnicas da APRH*, Portugal, 1987.
- [19] Janz, João António, “Águas de Abastecimento e Saneamento em Zonas Costeiras Turísticas, Avaliação de consumos de água,” em *II Jornadas Técnicas da APRH*, Portugal, Out, 1985.
- [20] “História,” Os SMCB, [Online]. Available: <https://www.sm-castelobranco.pt/os-smcb/historia.aspx>. [Accessed 28 Dezembro 2024].
- [21] APDA, Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos(ERSAR), “Os Contadores domiciliários de água,” Portugal, Abr, 2013.
- [22] “Serviços Municipalizados de Castelo Branco,” Câmara Municipal Castelo Branco, [Online]. Available: <https://www.cm-castelobranco.pt/munice/camara-municipal/servicos-municipais/smcB/>. [Acedido em 29 Dezembro Dez 29, 2024].
- [23] ERSAR, Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos, “REGULAMENTO DE RELAÇÕES COMERCIAIS DOS SERVIÇOS DE ÁGUAS E RESÍDUOS,” Portugal, Jul. 12, 2018.
- [24] Pacheco, João Ricardo Batista de Martins, “PERDAS EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO PÚBLICO DE ÁGUA. UMA NOVA ABORDAGEM COM BASE NA TELEMEDIÇÃO DE CONSUMOS DOMÉSTICOS,” FEUP- Universidade do Porto, Portugal, Set, 2010 .

- [25] Freitas, Paulo Filipe Da Silva, “OTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE CONTADORES DE LEITURA MANUAL ATRAVÉS DA CRIAÇÃO DE NOVOS CIRCUITOS E DE NOVAS ZONAS – APLICAÇÃO À CIDADE DO PORTO,” FEUP- Universidade do Porto, Portugal, Out, 2020.
- [26] SHMETERS, Metering Water’s Value, [Online]. Available: <https://pt.swatermeters.com/info/volumetric-water-meters-for-efficient-water-ma-81352622.html>. [Accessed 2 Janeiro 2025].
- [27] Janz, “Sabe quantos tipos de contadores de água existem?,” [Online]. Available: <https://cgf.janz.pt/sabe-quantos-tipos-de-contadores-de-agua-existem/>. [Accessed 7 Janeiro 2025].
- [28] “Como funciona um medidor de caudal ultrassónico: saiba mais sobre a tecnologia dos medidores de caudal ultrassónicos,” Fuji Eletric, [Online]. Available: <https://www.fujielectric.fr/pt/blogue/como-funcionam-os-medidores-de-caudal-ultra-sonicos-descubra-a-tecnologia-dos-medidores-de-caudal-ultra-sonicos/>. [Accessed 2 Janeiro 2025].
- [29] SH Meters, Metering Water’s Value, “Como funciona um medidor de água ultrassónico?,” [Online]. Available: <https://pt.shmeter.com/info/ultrasonic-water-meter-work-75694442.html>. [Accessed 2 Janeiro 2025].
- [30] Fang, L., Ma, X., Zhao, J., Faraj, Y., Wei, Z., & Zhu, Y. (2022). Development of a high-precision and wide-range ultrasonic water meter. *Flow Measurement and Instrumentation*, 84, 102118. <https://doi.org/10.1016/J.FLOWMEASINST.2021.102118>.
- [31] “SSM-Aquo, digitalização do caudal com contadores de água ultrassónicos,” Pietro Fiorentini, [Online]. Available: <https://www.fiorentini-iberia.com/pt/especialistas/agua/contadores-de-agua-ultra-sonicos-inteligentes/>. [Accessed 2 Janeiro 2025].
- [32] Sun, B., Chen, S., Liu, Q., Lu, Y., Zhang, C., & Fang, H. (2021). Review of sewage flow measuring instruments. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(2), 2089–2098. <https://doi.org/10.1016/J.ASEJ.2020.08.031>.
- [33] Saraiva de Sousa, N. F., Lachos Perez, D. A., Rosa, R. v., Santos, M. A. S., & Esteve Rothenberg, C. (2019). Network Service Orchestration: A survey. *Computer Communications*, 142–143, 69–94. <https://doi.org/10.1016/J.COMCOM.2019.04.008>.
- [34] Kipper, G. (2013). Visions of the Future. *Augmented Reality*, 129–142. <https://doi.org/10.1016/B978-1-59-749733-6.00006-1>.

- [35] Alqurashi, H.; Bouabdallah, F.; Khairullah, E. SCAP SigFox: A Scalable Communication Protocol for Low-Power Wide-Area IoT Networks. *Sensors* 2023, 23, 3732. <https://doi.org/10.3390/s23073732>.
- [36] Lavric, Alexandru & Petrariu, Adrian & Valentin, Popa. (2019). Long Range SigFox Communication Protocol Scalability Analysis Under Large-Scale, High-Density Conditions. *IEEE Access*. PP. 1-1. 10.1109/ACCESS.2019.2903157.
- [37] "What are LoRa and LoRaWAN?," The Things Network, [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/what-is-lorawan/>. [Accessed 15 Janeiro 2025].
- [38] Chaudhari, Bharat. (2020). LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications.
- [39] U. Raza, P. Kulkarni and M. Sooriyabandara, "Low Power Wide Area Networks: An Overview," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 855-873, Secondquarter 2017, doi: 10.1109/COMST.2017.2652320.
- [40] Sneha, Malik, P. K., Bilandi, N., & Gupta, A. (2022). Narrow band-IoT and long-range technology of IoT smart communication: Designs and challenges. *Computers & Industrial Engineering*, 172, 108572. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108572>.
- [41] "About 3GPP," 3GPP A Global Initiative, [Online]. Available: <https://www.3gpp.org/about-us>. [Accessed 15 Janeiro 2025].
- [42] A. D. Zayas and P. Merino, "The 3GPP NB-IoT system architecture for the Internet of Things," 2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), Paris, France, 2017, pp. 277-282, doi: 10.1109/ICCW.2017.7962670.
- [43] "orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM)," TechTarget, [Online]. Available: <https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/orthogonal-frequency-division-multiplexing>. [Accessed 16 Janeiro 2025].
- [44] "OFDMA — Mais Rápido, Maior Capacidade de Transporte com Wi-Fi 6," TP-LINK, [Online]. Available: <https://blog.tp-link.pt/ofdma-mais-rapido-maior-capacidade-de-transporte-com-wi-fi-6/>. [Acedido em 15 Janeiro 2025].
- [45] "Signal Chain Basics #81: OFDM Basics," Planet Analog, [Online]. Available: <https://www.planetanalog.com/signal-chain-basics-81-ofdm-basics/>. [Accessed 15 Janeiro 2025].

- [46] Migabo, Emmanuel & Djouani, Karim & Kurien, Anish. (2020). The Narrowband Internet of Things (NB-IoT) Resources Management Performance State of Art, Challenges, and Opportunities. IEEE Access. PP. 1-1. 10.1109/ACCESS.2020.2995938.
- [47] Li, Yuke & Cheng, Xiang & Cao, Yang & Wang, Dexin & Yang, Luliuting. (2017). Smart Choice for the Smart Grid: Narrowband Internet of Things (NB-IoT). IEEE Internet of Things Journal. PP. 1-1. 10.1109/JIOT.2017.2781251.
- [48] “Abou El Hassan, Adil & El mehdi, Abdelmalek & Saber, Mohammed. (2021). NB-IoT and LTE-M towards massive MTC: Complete performance evaluation for 5G mMTC. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. 23. 308. 10.11591/ijeecs.v23.i1.pp”.
- [49] Sneha, Malik, P. K., Bilandi, N., & Gupta, A. (2022). Narrow band-IoT and long-range technology of IoT smart communication: Designs and challenges. Computers & Industrial Engineering, 172, 108572. <https://doi.org/10.1016/J.CIE.2022.108572>.
- [50] “Comparing NB-IoT and eMTC: Making the Right Choice,” Narrowband, [Online]. Available: <https://www.narrowband.com/nb-iot-vs-emtc>. [Accessed 17 Janeiro 2025].
- [51] “LTE-M VS. NB-IoT,” Narrowband, [Online]. Available: <https://www.narrowband.com/ltem-vs-nbiot>. [Accessed 17 Janeiro 2025].
- [52] “Introduction to LTE-M: Advantages, Limitations, and Use Cases,” Syzen, [Online]. Available: <https://synzen.com.tw/blog/item/what-is-lte-m>. [Accessed 17 Janeiro 2025].
- [53] “What Is LTE-M? Long Term Evolution for Machines Explained,” Emnify, [Online]. Available: <https://www.emnify.com/iot-glossary/lte-m>. [Accessed 17 Janeiro 2025].
- [54] “A complete guide to LTE-M for IoT,” Onomondo, [Online]. Available: <https://onomondo.com/blog/lte-m-iot-guide/>. [Accessed 17 Janeiro 2025].
- [55] Eddy Bajic, Kais Mekki, Clement Rup. LTE-M communication for low-powered IIoT: An experimental performance study. 17th International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies, UBICOMM 2023, Sep 2023, Porto, Portugal.
- [56] “5 things to know about the LPWAN market in 2021,” IoT Analytics, [Online]. Available: <https://iot-analytics.com/5-things-to-know-lpwan-market/>. [Accessed 20 Janeiro 2025].

- [57] “State of IoT 2024: Number of connected IoT devices growing 13% to 18.8 billion globally,” IoT Analytics, [Online]. Available: <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/>. [Accessed 20 Janeiro 2025].
- [58] Álvares, Alberto José, Ana Carolina Alves Souza, and Matheus Feitosa de Castro. "Implementação de um aplicativo móvel (App) para leitura de medidores de água e energia baseado em visão computacional." *Revista Brasileira de Computação Aplicada* 12.3 (2020).
- [59] Perissinotto, Lucas, and Leandro Manera. "Projeto de um sistema para aquisição de dados de medidores volumétricos residenciais (hidrômetros) com telemetria, aplicando o conceito de IoT." *Revista dos Trabalhos de Iniciação Científica da UNICAMP* 27 (2019).
- [60] Bendiab, Gueltoum, et al. "Advanced metering infrastructures: Security risks and mitigation." *Proceedings of the 15th international conference on availability, reliability and security*. 2020.
- [61] Díaz Redondo, Rebeca P., Ana Fernández-Vilas, and Gabriel Fernández dos Reis. "Security aspects in smart meters: Analysis and prevention." *Sensors* 20.14 (2020): 3977.
- [62] A. T. S. Elisari, G. F. Vicentine, H. G. da Costa, e A. de C. Junior, "Levantamento das tecnologias sem fio para IoT e Indústria 4.0," *Revista Acadêmica - Ensino de Ciências e Tecnologias*, vol. 10, pp. 185–201, Junho 2022. [Online]. Available: <https://intranet.cbt.ifsp.edu.br/qualif/volume10/artigo16.pdf>.
- [63] “GEO.ANACOM: Plataforma Geoespacial com Informação sobre o Setor das Comunicações,” Autoridade Nacional de Comunicações (ANACOM), [Online]. Available: <https://geo.anacom.pt/publico/home>.
- [64] P. M. S. Rodrigues and J. M. G. P. Isidoro, “Estudo sobre os erros de exatidão em contadores de água volumétricos aplicados a consumidores domésticos na rede de distribuição de água na cidade de Beja (Portugal).”
- [65] “NB-IoT Compared to LoRa and Sigfox: A Comprehensive Comparison,” Narrowband, [Online]. Available: <https://www.narrowband.com/nb-iot-vs-lora-vs-sigfox>. [Accessed 17 Janeiro 2025].
- [66] “What is Narrowband IoT?,” Narrowband, [Online]. Available: <https://www.narrowband.com/what-is-narrowband-iot>. [Accessed 17 Janeiro 2025].
- [67] “NB-IoT Frequency Bands,” Narrowband, [Online]. Available: <https://www.narrowband.com/nbiot-glossary/nb-iot-frequency-bands>. [Accessed 17 Janeiro 2025].

- [68] GSM Association. (2018). GSM Association Non-confidential Official Document CLP.29-LTE-M Deployment Guide to Basic Feature Set Requirements LTE-M Deployment Guide to Basic Feature Set Requirements Version 2.0 Copyright Notice Antitrust Notice.