



**Politécnico
Castelo Branco**

Escola Superior
de Tecnologia



Monitorização remota de uma instalação experimental de controlo de água Projeto II

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.

Junho 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 II, 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 II. Gostaríamos também de agradecer, à Engenheira Susana Valente e ao Técnico Michael Lopes, o apoio prestado, tal como a 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 hidrômetros, com ênfase na utilização de tecnologias avançadas, como a Internet das Coisas (IoT), Narrowband-IoT (NB-IoT) e medição inteligente. O projeto apresenta uma solução inovadora para reduzir perdas e melhorar a precisão na medição do consumo de água. Foi desenvolvido um protótipo funcional utilizando um sensor de fluxo, comunicação via módulo SIM7080G com suporte à rede NB-IoT, e integração com o Azure IoT Hub através do protocolo MQTT. A solução permite a recolha automática de dados, armazenamento persistente na EEPROM, localização via GPS, e envio de medições para o Power BI. Os resultados obtidos com o protótipo demonstram a eficácia da solução na deteção e registo preciso do consumo de água, com comunicação estável via NB-IoT, visualização clara dos dados em tempo real no Power BI e capacidade de operação autónoma e persistente. Esta abordagem evidencia o potencial da modernização dos sistemas de medição para reduzir perdas, aumentar a eficiência operacional e promover uma gestão hídrica mais sustentável e inteligente.

Palavras-chave

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

Abstract

Water waste in metering systems has been a growing problem, with significant impacts on sustainability and water resource efficiency. 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 presents an innovative solution to reduce losses and improve accuracy in water consumption measurement. A functional prototype was developed using a flow sensor, communication via SIM7080G module with support for the NB-IoT network, and integration with the Azure IoT Hub through the MQTT protocol. The solution allows automatic data collection, persistent storage in EEPROM, location via GPS, and sending of measurements to Power BI. The results obtained with the prototype demonstrate the effectiveness of the solution in detecting and accurately recording water consumption, with stable communication via NB-IoT, clear visualization of real-time data in Power BI and the ability to operate autonomously and persistently. This approach highlights the potential of modernizing measurement systems to reduce losses, increase operational efficiency and promote more sustainable and intelligent water management.

Keywords

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

Índice geral

1	Introdução	1
1.1	Âmbito.....	1
1.2	Definição do Problema	2
1.3	Objetivos	2
1.4	Contribuições.....	4
1.5	Organização do Documento	4
2	Protótipo	5
2.1	Arquitetura	5
2.2	Hardware	6
2.3	Software.....	10
2.3.1	Desenvolvimento de Firmware para o Dispositivo IoT	10
2.3.2	Configuração do Resource Group	12
2.3.3	Configuração do IoT Hub e do Dispositivo	13
2.3.4	Configuração do Azure Stream Analytics	16
2.3.5	Configuração do Microsoft Power BI	18
2.3.6	Criação de dashboards no PowerBI	19
3	Testes de Validação e Avaliação de Desempenho	27
3.1	Objetivos e Metodologia	27
3.2	Procedimentos e Ambiente de Teste	27
3.3	Resultados dos Testes Funcionais	28
3.3.1	Análise de Desempenho	31
3.3.2	Validação Visual e Dados Observados.....	32
3.3.3	Conclusão da Validação.....	34
4	Análise de Custos da Solução Proposta	35
4.1	Custos de Hardware.....	35
4.2	Custos com serviços de cloud e comunicação.....	35
4.3	Comparação de custos com soluções atualmente utilizadas nos Serviços Municipalizados.....	37
4.4	Considerações finais	38
5	Conclusões e Trabalho Futuro	39
5.1	Conclusões	39
5.2	Desafios e Trabalho Futuro.....	40
	Referências Bibliográficas	41
	Anexo 1- Artigo Científico	45

Índice de figuras

Figura 1 – Arquitetura do protótipo concebido.....	5
Figura 2 – Integração dos componentes de hardware com o microcontrolador.	7
Figura 3 – Diagrama de pinos do LILYGO T-SIM7080G-S3 Fonte: [6].....	8
Figura 4 - Montagem do módulo LILYGO T-SIM7080G-S3 com todos os periféricos.....	9
Figura 5 - Bancada de testes com a componente física do protótipo.	10
Figura 6 - Fluxograma do Firmware implementado no LILYGO T-SIM7080G-S3.	12
Figura 7 - Criação do Resource Group HydrometerResourceGroup.....	13
Figura 8 - Criação do IoT Hub HydrometerIoT Hub.....	14
Figura 9 - Criação do Device HydrometerDevice-001.	14
Figura 10 - Criação da SharedAccessSignature associada ao IoT Hub e respectivo Dispositivo.....	15
Figura 11 - Input do IoT Hub no Azure Stream Analytics.....	16
Figura 12 - Output do Power BI no Azure Stream Analytics.	17
Figura 13 - Consulta de transformação SQL.	17
Figura 14 - Vista geral do Workspace no Power BI com o Conjunto de dados de streaming.....	18
Figura 15 - Criação do Relatório Hydrometer Report, destinado à hospedagem dos dashboards.....	19
Figura 16 - Tabela Hidrómetro juntamente com as suas variáveis e o painel de visualizações do PowerBI, onde são realizados os gráficos.	20
Figura 17 - Criação de um Visual do tipo cartão com a variável Total.....	21
Figura 18 - Criação do ArcGIS Maps for Power BI.	21
Figura 19 - Selecionar o Mapa Base OpenStreetMap no ArcGIS Maps for Power BI.....	22
Figura 20 - Selecionar a camada de mapa de calor para a visualização das coordenadas.....	22
Figura 21 - Criação da tabela dinâmica.....	23
Figura 22 - Criação do gráfico de colunas com as variáveis Litros e Hora.	23
Figura 23 - Criação do gráfico de linhas com as variáveis Minuto e Litros.	24

Figura 24 - Criação de um gráfico de barras com as variáveis Ano e Litros. .	25
Figura 25 - Criação do gráfico de barras agrupado com as variáveis Dia e Litros.	25
Figura 26 - Criação do gráfico de área com as variáveis Dia e Litros.	26
Figura 27 - Criação de um gráfico de barras com as variáveis Mês e Litros. .	26
Figura 28 - Serial a enviar os dados com sucesso para o IoT Hub.	28
Figura 29 - IoT Hub a receber os dados em tempo real.	29
Figura 30 - Fecho da ligação do protocolo MQTT após o envio de dados.	29
Figura 31 - Azure Stream Analytics com dados recebidos do IoT Hub.	30
Figura 32 - Amostra no PowerBI resultante do encaminhamento do Azure Stream Analytics.	31
Figura 33 - Falhas que podem ocorrer no protótipo.	32
Figura 34 - Dashboards PowerBI.	33
Figura 35 - Exemplo de um consumo anómalo.	33
Figura 36 - Custo total do hardware da solução. [24] [25].....	35
Figura 37 - Custos com Serviços de Cloud e Comunicação. [26] [27] [28].....	36
Figura 38 - Contadores existentes na infraestrutura dos SMCB.	37

Lista de tabelas

Tabela 1 - Cronograma.....	3
-----------------------------------	----------

Lista de abreviaturas, siglas e acrónimos

ANF – Águas não faturadas

ASA – Azure Stream Analytics

EEPROM – Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory

ERSAR – Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos

BLE – Bluetooth Low Energy

GND – Ground

GNSS – Global Navigation Satellite System

GPS – Global Positioning System

I2C – Inter-Integrated Circuit

IoT – Internet of Things

JSON – JavaScript Object Notation

LCD – Liquid Crystal Display

LTE - Long-Term Evolution

LTE-M – Long Term Evolution for Machines

MQTT – Message Queuing Telemetry Transport

NB-IoT – Narrowband Internet of Things

ONU – Organização das Nações Unidas

PMU – Power Management Unit

SAS – Shared Access Signature

SCL – Serial Clock Line

SDA – Serial Data Line

SIM – Subscriber Identity Module

SMCB – Serviços Municipalizados de Castelo Branco

SQL – Structured Query Language

TCP – Transmission Control Protocol

TLS – Transport Layer Security

VCC – Voltage at the Common Collector

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 II 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 implementação de um protótipo; (iv) a realização de demonstrações e testes funcionais e, por fim, (v) a avaliação de desempenho e validação do protótipo.

Como parte dos três primeiros objetivos intermédios foram alcançados no âmbito do Projeto I, o Projeto II passa a concentrar-se nos objetivos remanescentes. Para alcançar os objetivos acima identificados, elaborou-se um cronograma, conforme apresentado na **Tabela 1**, que engloba as seguintes tarefas:

Tarefa 1 – Implementação de um protótipo demonstrador, para monitorização e controlo do consumo de água em redes de distribuição via rede NB-IoT.

Tarefa 2 – Desenvolvimento do firmware para medição do fluxo de água: Desenvolver o código para um sistema que lê um sensor de fluxo de água, calcula o volume em litros, salva os dados na EEPROM e envia para o Azure IoT Hub via MQTT. O sistema também obtém coordenadas GPS, exibe as informações em um display LCD e realiza a gestão da energia com a PMU via I2C.

Tarefa 3 – Integração do dispositivo com o Azure e encaminhamento de dados: Criar os recursos necessários no Azure para receber os dados do dispositivo, incluindo o IoT Hub e o registo do dispositivo correspondente. Estabelecer a comunicação segura entre o firmware desenvolvido e o IoT Hub. Configurar o Azure Stream Analytics para processar os dados em tempo real e envio destes para o Power BI.

Tarefa 4 – Desenvolvimento de dashboards no Power BI para visualização dos dados: Criar dashboards no Power BI conectados ao conjunto de dados de streaming, permitindo a visualização em tempo real dos consumos de água, localização geográfica dos sensores.

Tarefa 5 – Testes funcionais e avaliação de desempenho: Realizar testes do sistema integrado, desde a recolha dos dados no sensor até à visualização no Power BI, para assim, validar a fiabilidade, precisão e tempo de resposta.

Tabela 1 – Cronograma.

Ano	2025				
Mês Tarefas	FEVEREIRO	MARÇO	ABRIL	MAIO	JUNHO
1					
2					
3					
4					
5					

1.4 Contribuições

O trabalho desenvolvido no âmbito de Projeto II complementa e expande os resultados iniciais obtidos em Projeto I, resultando numa proposta de arquitetura a apresentar aos Serviços Municipalizados de Castelo Branco, para desenvolvimento futuro de um novo processo de recolha de contagens/identificação de fugas de água.

Deste projeto resulta ainda a submissão do artigo científico intitulado *“Remote Monitoring of Water Consumption Using NB-IoT and Cloud-Based Visualization: A Case Study from Castelo Branco, Portugal”*

Bruno Proença¹, Diogo Canoso¹, Eurico Ribeiro Lopes¹, Luís Miguel Barata^{1,2, *}

¹ Instituto Politécnico de Castelo Branco, Escola Superior de Tecnologia, Castelo Branco, Portugal

² Instituto de Telecomunicações, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal

Em processo de submissão à revista: Springer Water Resources Management - An International Journal, publicada pela European Water Resources Association (EWRA).

1.5 Organização do Documento

Este documento encontra-se estruturado em 5 capítulos.

O Capítulo 1 introduz e contextualiza o tema do trabalho, apresentando o seu enquadramento e relevância.

No Capítulo 2, é descrito o protótipo desenvolvido. Este capítulo encontra-se subdividido em várias secções: a arquitetura do sistema (2.1), os componentes utilizados, nomeadamente o módulo T-SIM7080G-S3 e periféricos (2.2.1), e o software implementado (2.3), incluindo o desenvolvimento do firmware para o dispositivo IoT (2.3.1), a configuração do Resource Group (2.3.2), do IoT Hub e do dispositivo (2.3.3), do Azure Stream Analytics (2.3.4) e, por fim, do Microsoft Power BI (2.3.5).

O Capítulo 3 apresenta os testes de validação e a avaliação de desempenho da solução proposta. São descritos os objetivos e a metodologia adotada (3.1), os procedimentos e o ambiente de teste (3.2), e os resultados obtidos (3.3), incluindo a análise de desempenho (3.3.1), a validação visual e os dados observados (3.3.2), e as conclusões da validação (3.3.3).

O Capítulo 4 foca-se na análise de custos, permitindo aferir a viabilidade económica da implementação da solução desenvolvida.

Finalmente, o Capítulo 5 apresenta as conclusões gerais do trabalho (5.1), identifica os principais desafios enfrentados e discute as perspetivas de continuidade e desenvolvimento futuro no âmbito do Projeto II (5.2).

2 Protótipo

Este capítulo descreve o protótipo concebido no âmbito deste projeto. Inicialmente, é apresentada a arquitetura do sistema, acompanhada da fundamentação das principais decisões tomadas durante a sua definição. Seguidamente, são detalhados os processos de implementação do hardware e do firmware, evidenciando as escolhas técnicas e as etapas envolvidas na construção do sistema funcional.

2.1 Arquitetura

A arquitetura do protótipo da solução desenvolvida, que tem como objetivo monitorizar, de forma inteligente, o consumo de água nas redes de abastecimento. Este sistema **permite recolher dados em tempo real** sobre o fluxo de água, volume consumido e localização geográfica dos dispositivos, enviando-os para uma plataforma na cloud, onde são processados e visualizados.

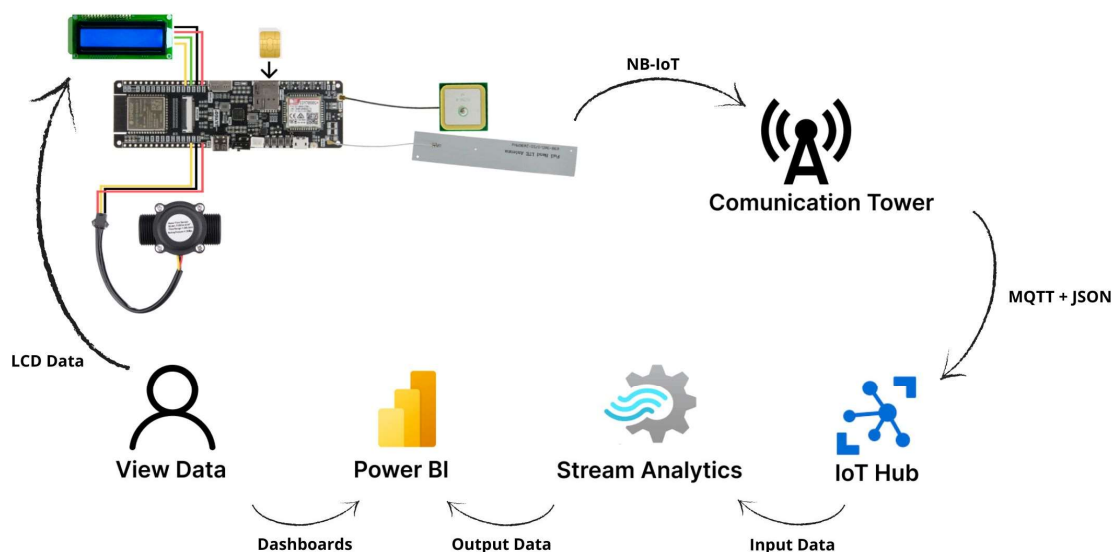


Figura 1 – Arquitetura do protótipo concebido.

A **Figura 1** apresenta a componente física do protótipo, composta por um microcontrolador LILYGO T-SIM7080G-S3 [6], equipado com um cartão SIM com conectividade NB-IoT. O módulo SIM7080G [7] é responsável pela obtenção de coordenadas GPS e pela comunicação com a torre de controlo que posteriormente irá fazer o envio dos dados para o dispositivo registado no Azure IoT Hub [8]. A conexão GPS e à rede NB-IoT é realizada com o apoio de antenas acopladas externamente ao módulo. Ligado a este microcontrolador está um sensor de fluxo de água FS300A [9], que regista os pulsos correspondentes à passagem de água, permitindo o cálculo do volume consumido. Para garantir a legibilidade local das medições, é utilizado um ecrã LCD QAPASS 1602A [10], ligado via interface I2C.

Adicionalmente, o sistema de gestão de energia (PMU) AXP2101 fornece a regulação e monitorização da energia do sistema.

Os dados recolhidos pelo sensor de fluxo são processados localmente pelo firmware desenvolvido em C++ implementado no microcontrolador. Este firmware calcula o volume de água em litros, acumula o total na memória EEPROM, obtém a timestamp via rede e as coordenadas GPS. Em intervalos definidos, os dados são formatados em JSON e enviados via protocolo MQTT [11] para o serviço Azure IoT Hub, garantindo a comunicação segura e eficiente com a cloud.

No lado da cloud, o Azure IoT Hub atua como ponto central de receção dos dados provenientes dos dispositivos. Estes dados são depois encaminhados para o Azure Stream Analytics [12], onde são processados em tempo real. O Stream Analytics permite transformar, agregar e filtrar os dados, antes de os enviar diretamente para o conjunto de dados de streaming no Microsoft Power BI [13]. Através do Power BI, é possível visualizar, em tempo real, dashboards com gráficos sobre o volume de água consumido, histórico de medições e localização dos sensores.

A escolha desta arquitetura distribuída e baseada em serviços cloud visa garantir escalabilidade, robustez e monitorização em tempo real. A separação entre a recolha física de dados e o seu processamento e visualização permite uma maior flexibilidade e futuras expansões, como a integração com outras redes ou a inclusão de novos tipos de sensores. [14]

2.2 Hardware

O LILYGO T-SIM7080G-S3 [6] é um microcontrolador compacto e altamente eficiente, baseado no ESP32-S3 [15], adequado para aplicações IoT. Este dispositivo permite a comunicação via rede NB-IoT utilizando o módulo SIMCom SIM7080G [7]. O microcontrolador possui conectividade Wi-Fi e Bluetooth Low Energy (BLE), além de uma porta USB-C para programação e alimentação. A placa tem ainda a capacidade de acoplar uma bateria 18650 de lítio, e permite a ligação de uma célula fotovoltaica de 4.4 a 6V, que além de alimentar o sistema, pode também carregar a bateria integrada.

Para comunicações móveis, é utilizado um cartão SIM NB-IoT da operadora MEO [16], que possibilita o envio de dados através da rede Narrowband-IoT, permitindo uma ligação de baixo consumo e longa distância, ideal para aplicações em locais remotos. O módulo suporta também redes LTE-M e GNSS (GPS/GLONASS/BeiDou/Galileo), fornecendo o posicionamento geográfico sempre que necessário. As antenas fornecidas com o dispositivo garantem uma ligação estável e eficiente, tanto para a rede LTE full band como para o posicionamento GPS, sendo conectadas através de interfaces U.FL.

Para a medição do fluxo de água, foi integrado o sensor FS300A de (3/4") [9]. Este sensor é do tipo hall-effect, com capacidade de deteção de caudal entre 1 a 60 litros por minuto, operando com uma tensão de alimentação entre 3.5V e 24V. Gera pulsos proporcionais à quantidade de água que passa, permitindo uma medição precisa do volume de água consumido.

O sistema também inclui um display LCD QAPASS 1602A (16x2) [10], que fornece os pulsos e o fluxo de água, bem como o total de água consumida. Este módulo apresenta dois segmentos de 16 caracteres, retroiluminação ajustável e interface paralela ou I2C, permitindo a integração com o ESP32-S3.

A **Figura 2** ilustra a integração do LILYGO T-SIM7080G-S3 e dos seus periféricos, demonstrando como os componentes se interligam entre si para efetuar recolha, apresentação e transmissão de dados.

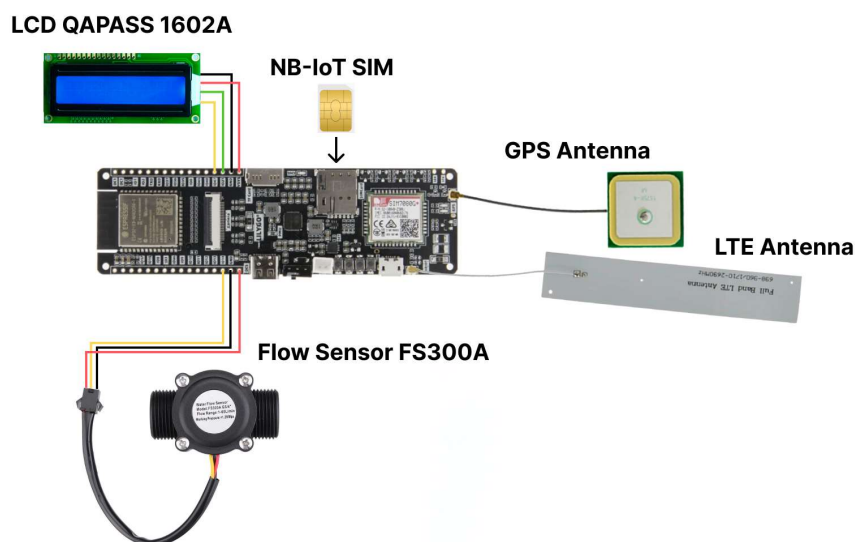


Figura 2 – Integração dos componentes de hardware com o microcontrolador.

Apresenta-se de seguida os passos executados para a integração dos componentes de hardware utilizados com a placa LILYGO T-SIM7080G-S3. Inicialmente, é inserido o cartão SIM com capacidade para comunicações NB-IoT no respetivo slot SIM da placa.

Segue-se a ligação do sensor de fluxo de água FS300A, este sensor possui três fios: o fio vermelho é ligado ao pino de alimentação DC5 da placa, o fio preto ao pino GND (terra), e o fio amarelo, correspondente ao sinal de pulso digital, é conectado ao pino GPIO14, configurado como entrada digital para a medição do fluxo de água. A calibração da leitura do sensor baseia-se na frequência dos pulsos emitidos durante o escoamento de água, em que 360 pulsos correspondem a 1 litro de água, permitindo estimar o volume total de água consumido.

Posteriormente, procede-se à ligação do LCD QAPASS 1602A, um ecrã alfanumérico baseado no controlador HD44780. O módulo I2C é encaixado no LCD e ligado à placa através de apenas quatro fios: alimentação (VCC), terra (GND), linha de dados (SDA) e linha de relógio (SCL). Estes pinos são ligados respetivamente aos pinos 5V, GND, GPIO21 (SDA) e GPIO47 (SCL) do microcontrolador. Esta funcionalidade só é possível porque o endereço I2C é configurado via software para permitir a utilização de um segundo barramento para estes pinos, uma vez que os pinos SDA e SCL estão originalmente configurados para a PMU e sem acesso físico [17].

As antenas LTE full-band e GPS, incluídas com o módulo SIM7080G, são ligadas às portas U.FL correspondentes da placa T-SIM7080G-S3. A antena LTE garante conectividade com a rede NB-IoT para o envio de dados, enquanto a antena GPS permite obter coordenadas geográficas, útil em aplicações de localização. Ambas as antenas devem ser posicionadas com boa visibilidade para maximizar o sinal, conforme as boas práticas descritas pelo fabricante [18].

Esta integração é concluída com a alimentação do sistema através da porta USB-C, garantindo o fornecimento de energia estável tanto ao microcontrolador como aos periféricos ligados.

A **Figura 3** apresenta todas as interfaces e conexões previamente descritas, evidenciando os pontos de integração de cada componente de hardware no sistema.

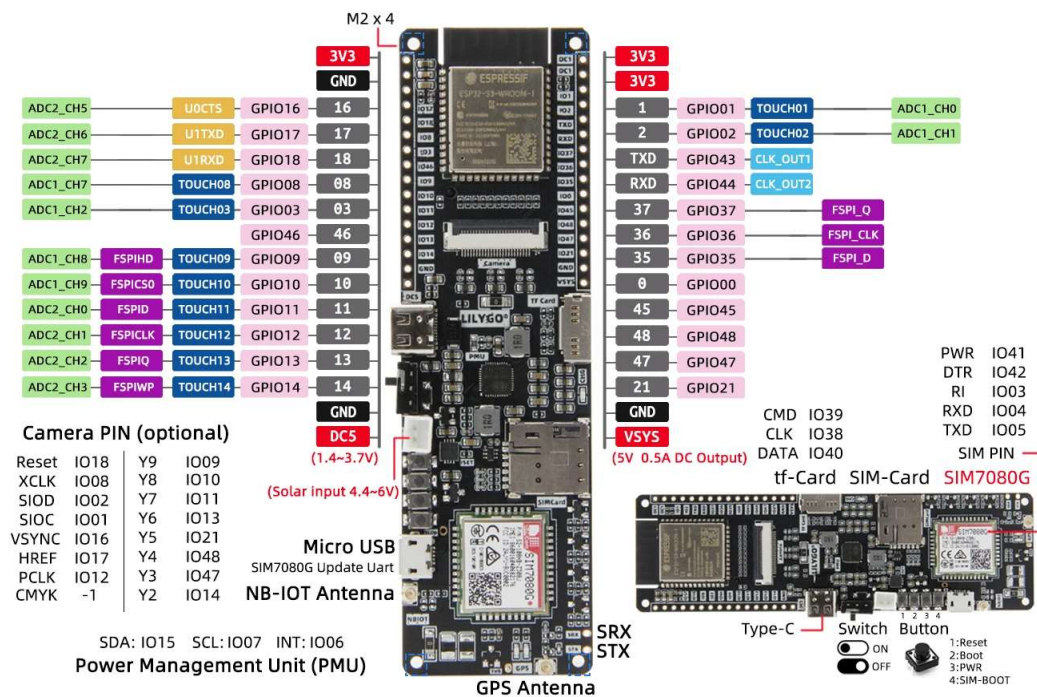


Figura 3 – Diagrama de pinos do LILYGO T-SIM7080G-S3 Fonte: [6].

A **Figura 4** ilustra a montagem do módulo LILYGO T-SIM7080G-S3 com todos os periféricos devidamente integrados: cartão SIM inserido, sensor de fluxo conectado à interface correspondente, display LCD alimentado e operacional, e antenas instaladas nas portas U.FL apropriadas.

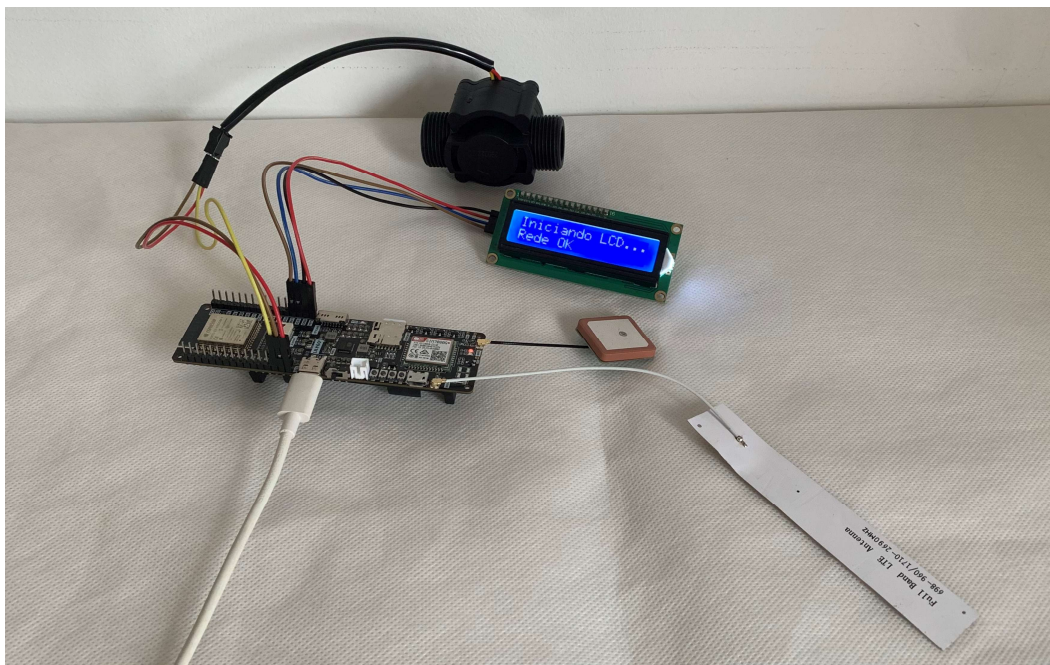


Figura 4 - Montagem do módulo LILYGO T-SIM7080G-S3 com todos os periféricos.

A **Figura 5** apresenta a bancada de testes juntamente com a componente física do protótipo, representando um cenário simulado de aplicação prática do projeto. Neste cenário, o sistema funciona como um hidrómetro: a água proveniente da rede é conduzida até ao sensor de fluxo, o qual gera pulsos proporcionais ao volume circulante. A cada 5 segundos, o display LCD atualiza e exibe, na primeira linha, os pulsos e o fluxo instantâneo em litros, e, na segunda linha, o consumo acumulado em litros, que será guardado na EEPROM. Paralelamente, se for detetado fluxo de água durante esse intervalo, ou seja, se forem registados pulsos no sensor de fluxo, um conjunto de dados estruturados em JSON [19] é gerado e enviado para o Azure IoT Hub.



Figura 5 - Bancada de testes com a componente física do protótipo.

2.3 Software

Esta subsecção descreve os principais elementos de software desenvolvidos e configurados para a implementação da solução IoT.

2.3.1 Desenvolvimento de Firmware para o Dispositivo IoT

A primeira etapa no desenvolvimento do sistema foi a programação do microcontrolador ESP32-S3 da placa LILYGO T-SIM7080G-S3. Para isso, foi utilizado o Arduino IDE [20], juntamente com as bibliotecas necessárias para a comunicação com os periféricos e envio de dados para o Azure IoT Hub. Entre as bibliotecas fundamentais utilizadas destacam-se:

- TinyGSM, para comunicação NB-IoT com o modem SIM7080G;
- PubSubClient, para envio de dados através do protocolo MQTT;
- EEPROM, para armazenamento não volátil do volume total de água;
- Wire e LiquidCrystal_I2C, para controlo do ecrã LCD 1602A com interface I2C;
- ArduinoJson, para estruturação e serialização dos dados em formato JSON.

A configuração inicial foi a configuração do sensor de fluxo de água, ligado ao pino digital 14 e configurado com uma interrupção externa. Esta interrupção é acionada sempre que o sensor deteta a passagem de um pequeno volume de água, gerando um impulso elétrico. A cada impulso, uma função específica é automaticamente executada para incrementar um contador, permitindo a contagem precisa do número total de impulsos gerados.

Durante cada ciclo de envio de dados, o número de pulsos registado desde o último envio é convertido em litros com base num fator de calibração (360 pulsos por litro), este valor é fornecido pelo fabricante. O volume calculado é então somado ao total acumulado e armazenado na memória EEPROM, garantindo a persistência da informação mesmo após o reinício do dispositivo.

Em seguida foi realizada a inicialização do LCD QAPASS 1602A, que apresenta ao utilizador o número de impulsos registados, o volume de água instantâneo e o volume total acumulado desde o último reinício do dispositivo. De seguida, foi estabelecida a comunicação com a unidade de gestão de energia (PMU), responsável pela distribuição de tensão à placa.

No que toca à comunicação, o módulo SIM7080G foi configurado para operar em modo NB-IoT, com ligação à rede da operadora MEO através do cartão SIM e o APN "internet". Após a ligação bem-sucedida, o microcontrolador executa comandos AT para ativar o GPS da placa e obter as coordenadas geográficas. A posição é obtida apenas uma vez, após a obtenção de um 'fix' válido, sendo o GNSS posteriormente desativado para poupar energia.

Com os periféricos devidamente configurados, o dispositivo estabelece comunicação com o serviço Azure IoT Hub, utilizando o protocolo MQTT sobre TLS (porta 8883). A autenticação é feita por meio de um token SharedAccessSignature previamente gerado.

O firmware executa um ciclo periódico de envio de dados a cada 5 segundos, realizando os seguintes passos:

1. Leitura do número de impulsos desde o último ciclo e conversão para litros;
2. Obtenção da data e hora atual via comando AT+CCLK?;
3. Aquisição da localização GPS (apenas uma vez, após fixação inicial);
4. Atualização do LCD com os valores de consumo, impulsos e consumo total;
5. Construção de uma estrutura JSON com volume, pulsos, data/hora, coordenadas GPS e total acumulado (apenas se for detetado fluxo de água);
6. Publicação da mensagem no tópico MQTT correspondente do IoT Hub (apenas se for detetado fluxo de água);
7. Encerramento da ligação MQTT até ao próximo ciclo.

Desta forma, o dispositivo opera de forma autónoma e eficiente, permitindo a monitorização contínua do consumo de água com o envio periódico de dados fiáveis, enriquecidos com marca temporal e localização geográfica.

A **Figura 6** ilustra o fluxograma do firmware concebido e posteriormente implementado no microcontrolador, detalhando a lógica sequencial das operações executadas pelo dispositivo.

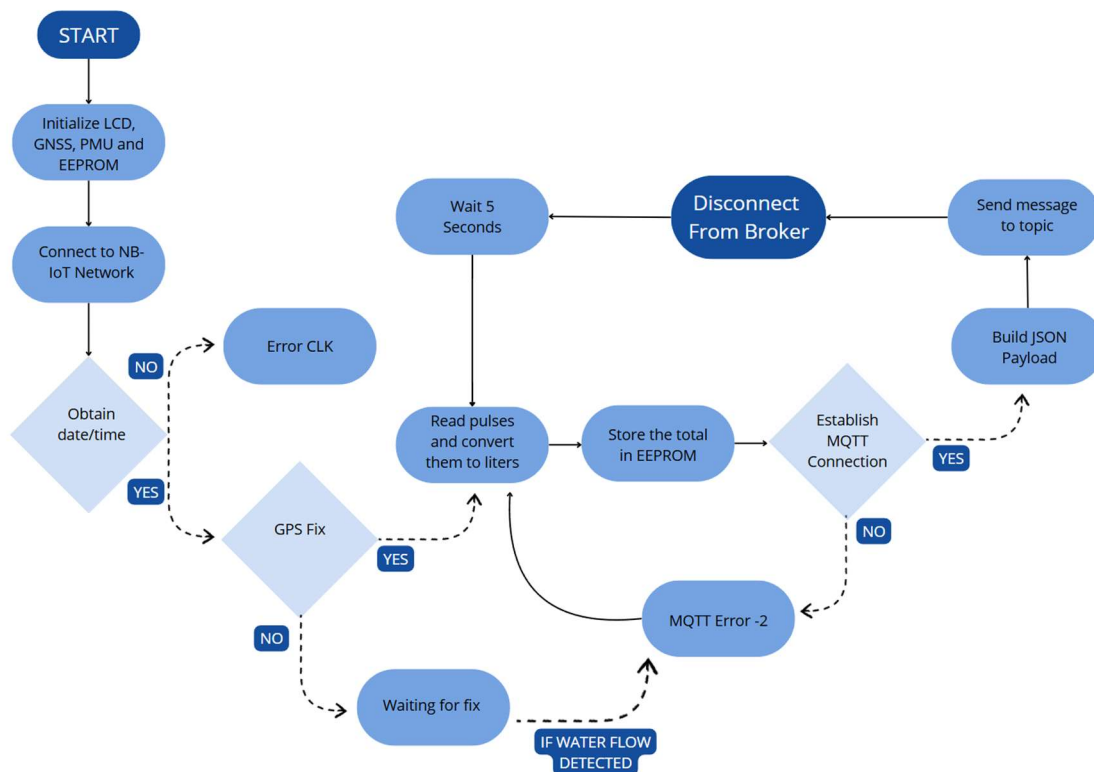


Figura 6 - Fluxograma do Firmware implementado no LILYGO T-SIM7080G-S3.

2.3.2 Configuração do Resource Group

Um Resource Group no Azure funciona como um container lógico que agrupa todos os recursos de uma solução, como o IoT Hub e os seus dispositivos associados, máquinas virtuais, bases de dados, entre outros, permitindo uma gestão centralizada, controlada e eficiente.

Para organizar e gerir de forma eficaz os recursos relacionados com o protótipo desenvolvido, foi criado no Microsoft Azure um Resource Group com a designação *HydrometerResourceGroup*.

Durante a sua configuração inicial, foi selecionada a região geográfica mais próxima dos utilizadores e do dispositivo, o Sul do Reino Unido, com o objetivo de minimizar a latência nas comunicações e garantir um melhor desempenho.

A utilização do *HydrometerResourceGroup* possibilitou consolidar, de forma simples e eficaz, todos os serviços necessários ao funcionamento do sistema, facilitando a sua manutenção, escalabilidade e eventual replicação ou remoção em ambientes de teste **ou produção**.

A **Figura 7** ilustra a criação do Resource Group *HydrometerResourceGroup*, responsável pela gestão centralizada dos recursos da solução IoT.

The screenshot shows the Azure portal interface for a resource group named 'HydrometerResourceGroup'. The page is divided into several sections:

- Overview:** A sidebar on the left with navigation options like Activity log, Access control (IAM), Tags, Resource visualizer, Events, Settings, Cost Management, Monitoring, Automation, and Help.
- Essentials:** A section containing key information:
 - Subscription: [\(move\)](#) [Azure for Students](#)
 - Subscription ID: f4cbfb8d-1db3-48b7-8794-64027d402100
 - Location: UK South
 - Tags: [\(edit\)](#) [Add tags](#)
 - Deployments: [No deployments](#)
- Resources:** A section with a filter bar (Type equals all, Location equals all, Add filter) and a message: 'Showing 0 to 0 of 0 records. Show hidden types. No grouping. List view'. Below this is a table header with columns for Name, Type, and Location.
- Message:** A large message in the center stating 'No resources match your filters' with a link to 'Give feedback'.

Figura 7 - Criação do Resource Group *HydrometerResourceGroup*.

2.3.3 Configuração do IoT Hub e do Dispositivo

Para possibilitar a comunicação entre o dispositivo IoT e os serviços em cloud, foi configurado o Azure IoT Hub, um serviço gerido pela Microsoft que atua como ponto central de receção, autenticação e encaminhamento de mensagens provenientes dos dispositivos conectados.

Durante a criação do IoT Hub, foram definidas várias opções essenciais, incluindo o nome do hub, *HydrometerIoTHub* e a seleção do nível Basic, apropriado para a fase de prototipagem, permitindo o envio de até 400 000 mensagens por dia. Foi também escolhida a mesma região geográfica do Resource Group previamente criado (Sul do Reino Unido), garantindo assim uma integração eficiente com os restantes serviços.

Esta configuração pode ser visualizada na **Figura 8**.

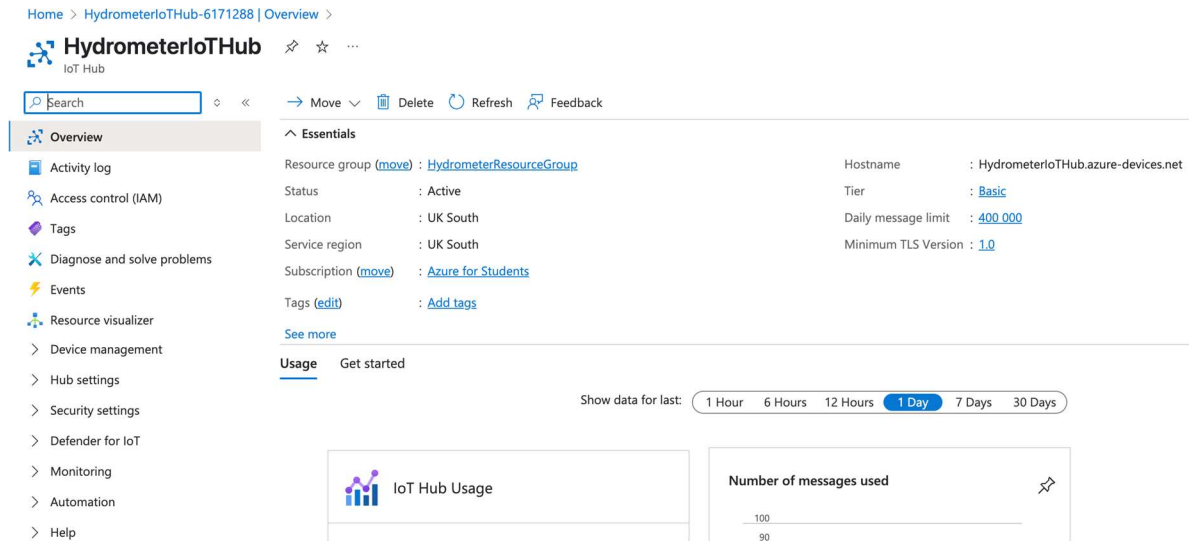


Figura 8 - Criação do IoT Hub *HydrometerIoT Hub*.

Após a criação do IoT Hub, foi registado um dispositivo virtual com o nome *HydrometerDevice-001*, o qual representa logicamente o microcontrolador físico (ESP32-S3) no ecossistema da Azure Cloud. Após este registo, foi gerado uma Connection String, contendo as credenciais necessárias para autenticação segura do dispositivo no IoT Hub. Esta configuração pode ser observada na **Figura 9**.

No firmware implementado no microcontrolador, esta Connection String é utilizada para estabelecer uma ligação segura via protocolo MQTT sobre TLS (porta 8883). Este protocolo foi escolhido pela sua leveza e segurança, sendo amplamente utilizado em ambientes IoT.



Figura 9 - Criação do Device *HydrometerDevice-001*.

A autenticação é realizada com recurso a um token SharedAccessSignature (SAS) que é gerado manualmente na Cloud Shell. Este token garante a integridade da comunicação e possui validade temporária, assegurando uma maior segurança na troca de dados. No caso deste protótipo, foi configurada uma validade aproximada de três meses, conforme ilustrado na **Figura 10**.

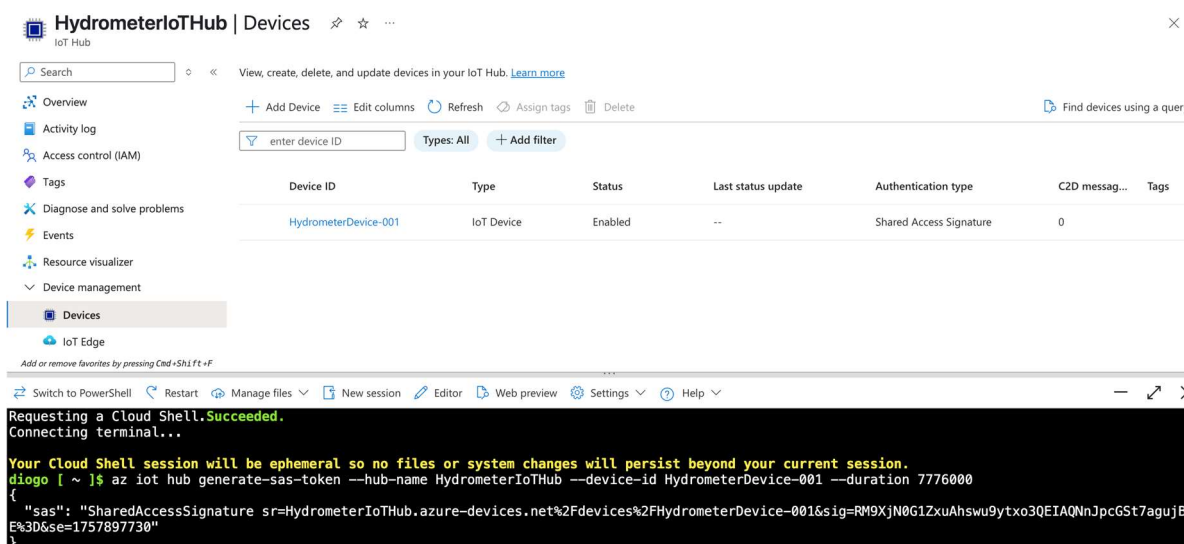


Figura 10 - Criação da SharedAccessSignature associada ao IoT Hub e respetivo Dispositivo.

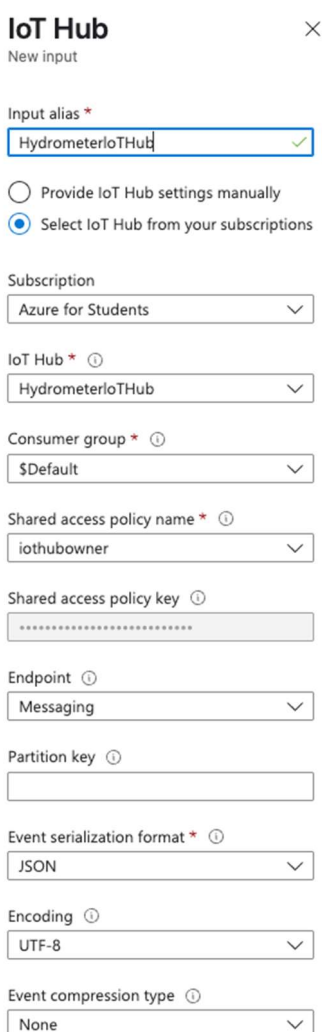
O IoT Hub passa assim a atuar como recetor das mensagens JSON enviadas periodicamente pelo dispositivo. Essas mensagens incluem informações como: número de pulsos do sensor de fluxo, volume de água registado, localização GPS e timestamp da leitura.

A correta configuração do IoT Hub e do dispositivo associado permitiu estabelecer uma ligação fiável, segura e escalável entre o hardware físico e os serviços posteriores de análise e de visualização na Azure Cloud.

2.3.4 Configuração do Azure Stream Analytics

Para possibilitar o processamento em tempo real dos dados recebidos a partir do dispositivo IoT, foi utilizado o serviço Azure Stream Analytics (ASA). Este serviço permite ingerir, analisar e redirecionar dados em fluxo contínuo de forma eficiente, sendo ideal para soluções de monitorização como a desenvolvida neste projeto.

Durante a configuração do job do Stream Analytics, foi definido como input o IoT Hub previamente criado, responsável por receber as mensagens enviadas pelo dispositivo. A ligação foi estabelecida através do consumer group padrão, com formato de entrada JSON, conforme apresentado na **Figura 11**, garantindo total compatibilidade com a estrutura das mensagens publicadas.

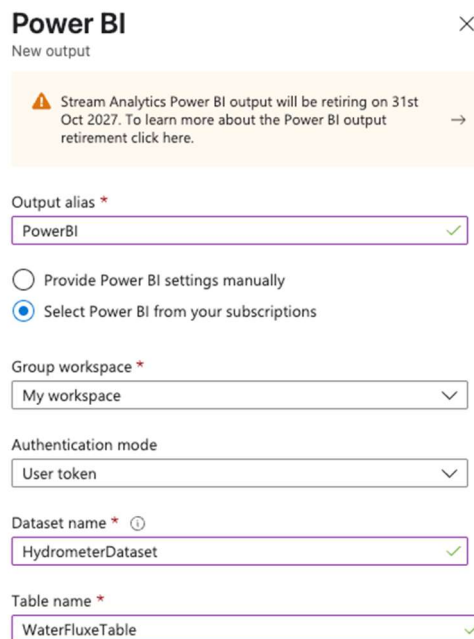


The image shows a configuration form for a new IoT Hub input in Azure Stream Analytics. The form is titled "IoT Hub" and "New input". It contains several fields and options:

- Input alias ***: A text box containing "HydrometerIoTHub" with a green checkmark.
- Options**: Two radio buttons. The first is "Provide IoT Hub settings manually" (unselected). The second is "Select IoT Hub from your subscriptions" (selected).
- Subscription**: A dropdown menu showing "Azure for Students".
- IoT Hub ***: A dropdown menu showing "HydrometerIoTHub".
- Consumer group ***: A dropdown menu showing "\$Default".
- Shared access policy name ***: A dropdown menu showing "iothubowner".
- Shared access policy key**: A text box containing a series of asterisks.
- Endpoint**: A dropdown menu showing "Messaging".
- Partition key**: An empty text box.
- Event serialization format ***: A dropdown menu showing "JSON".
- Encoding**: A dropdown menu showing "UTF-8".
- Event compression type**: A dropdown menu showing "None".

Figura 11 - Input do IoT Hub no Azure Stream Analytics.

Em seguida, foi configurado o output para o Microsoft Power BI, visível na **Figura 12**. O output permite a visualização em tempo real dos dados do consumo de água. Para isso, foi necessário autenticar a conta do Power BI e seleccionar o workspace e o dataset de destino, onde as tabelas e os gráficos seriam atualizados automaticamente com base nos dados recebidos.



Power BI ✕
New output

⚠ Stream Analytics Power BI output will be retiring on 31st Oct 2027. To learn more about the Power BI output retirement click here. →

Output alias *
PowerBI ✓

Provide Power BI settings manually
 Select Power BI from your subscriptions

Group workspace *
My workspace ▾

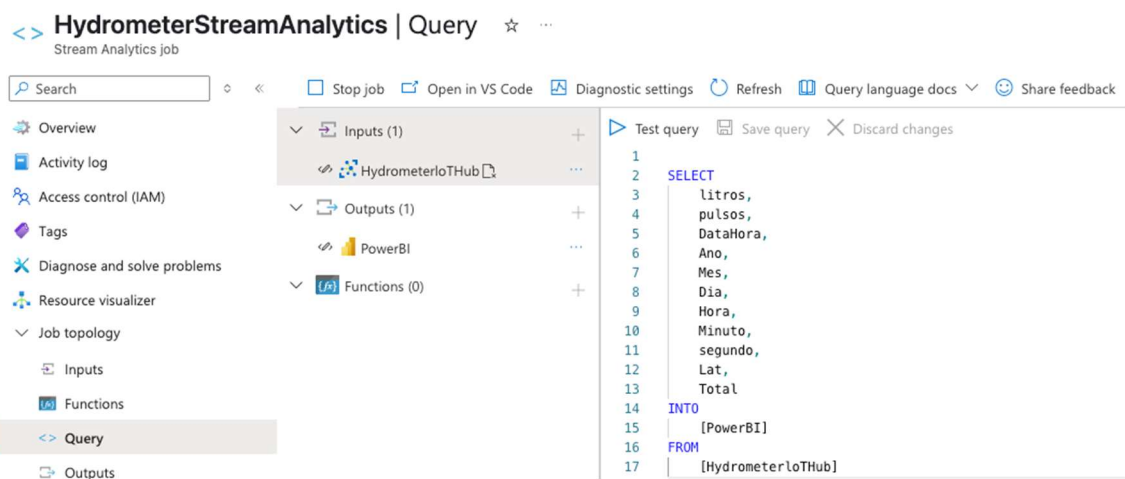
Authentication mode
User token ▾

Dataset name * ⓘ
HydrometerDataset ✓

Table name *
WaterFluxeTable ✓

Figura 12 - Output do Power BI no Azure Stream Analytics.

Por fim, foi criada a consulta de transformação SQL, apresentada na **Figura 13**, responsável por extrair, filtrar e projetar apenas os campos relevantes da mensagem JSON, tais como: volume instantâneo, número de pulsos, data/hora, ano, dia, hora, minuto, segundo, coordenadas GPS e total acumulado. Esta consulta assegura que os dados enviados para o Power BI estejam corretamente estruturados e prontos para visualização imediata.



```
1 SELECT
2   litros,
3   pulsos,
4   DataHora,
5   Ano,
6   Mes,
7   Dia,
8   Hora,
9   Minuto,
10  segundo,
11  Lat,
12  Total
13 INTO
14  [PowerBI]
15 FROM
16  [HydrometerIoTHub]
```

Figura 13 - Consulta de transformação SQL.

A utilização do Azure Stream Analytics neste contexto permite não só o encaminhamento eficiente dos dados, como também a sua eventual transformação, agregação ou filtragem, preparando-os para os dashboards e relatórios em tempo real no Power BI.

2.3.5 Configuração do Microsoft Power BI

O Microsoft Power BI foi utilizado como ferramenta de visualização para apresentar os dados recolhidos pelo dispositivo IoT de forma clara, interativa e em tempo real. Esta integração com os serviços da Azure permite criar dashboards dinâmicos, facilitando a análise do consumo de água e o acompanhamento das variáveis enviadas pelo sistema.

A configuração iniciou-se com a autenticação da conta Power BI durante a definição do output no serviço Azure Stream Analytics. Após a autorização, foi selecionado o workspace pretendido, sendo criado um dataset com base na estrutura dos dados recebidos do IoT Hub.

No Power BI, foi então possível construir visualizações personalizadas, a partir do conjunto de dados de streaming apresentado na **Figura 14**. Os campos enviados como, volume instantâneo, volume total acumulado, número de impulsos, data/hora e coordenadas GPS foram utilizados para criar gráficos de linhas, indicadores numéricos, tabelas e mapas geográficos que representam, em tempo real, o desempenho e a localização do sistema. Esta abordagem facilita a análise de padrões de consumo, bem como a deteção de comportamentos anómalos ou picos de utilização.

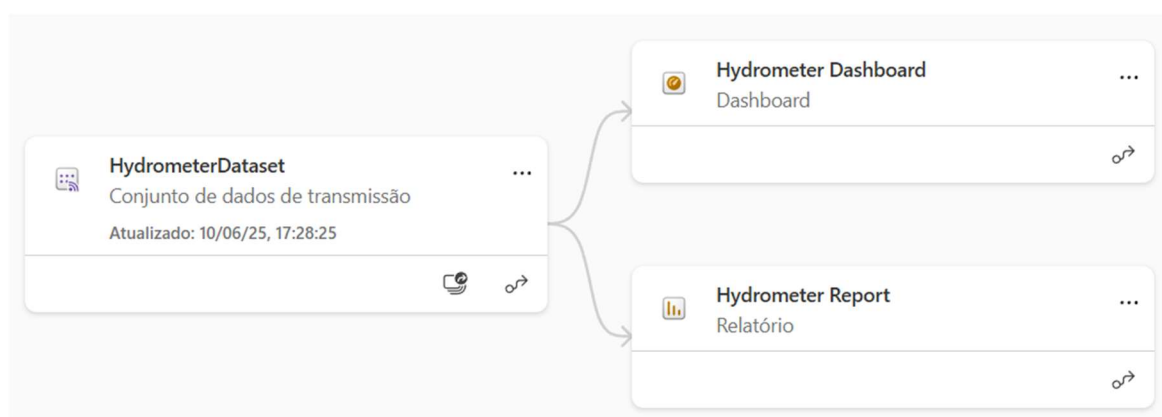


Figura 14 - Vista geral do Workspace no Power BI com o Conjunto de dados de streaming.

A integração com o Azure Stream Analytics garante que os dados são atualizados em tempo real, sem necessidade de intervenção manual, assegurando a consistência e a atualidade da informação apresentada ao utilizador.

2.3.6 Criação de dashboards no PowerBI

Após a correta integração dos dados provenientes do dispositivo de monitorização na cloud, através do Azure IoT Hub, Stream Analytics e Power BI, procedeu-se à construção de um painel interativo no Power BI, com o objetivo de representar, de forma visual, dinâmica e intuitiva, os registos recolhidos pelo sistema de controlo de fluxo de água.

A configuração inicial consistiu na criação de um novo relatório designado de *Hydrometer Report*, ao qual foi associado a tabela denominada *hidrómetro*. Esta tabela contém múltiplos atributos temporais e geográficos, nomeadamente DataHora, Ano, Mês, Dia, Hora, Minuto, Segundo, bem como dados de localização (Lat, Lon) e métricas de consumo (litros, pulsos e o Total), como é possível verificar na **Figura 16**. Estes campos foram imediatamente reconhecidos e disponibilizados no painel lateral Dados.

No painel de Visualização do Power BI, os campos foram organizados e explorados com recurso a elementos gráficos adequados à natureza da informação apresentadas na **Figura 16**.



Criar elementos visuais com os seus dados

Selecione ou arraste os campos do painel **Dados** para a tela do relatório.



Figura 15 - Criação do Relatório *Hydrometer Report*, destinado à hospedagem dos dashboards.

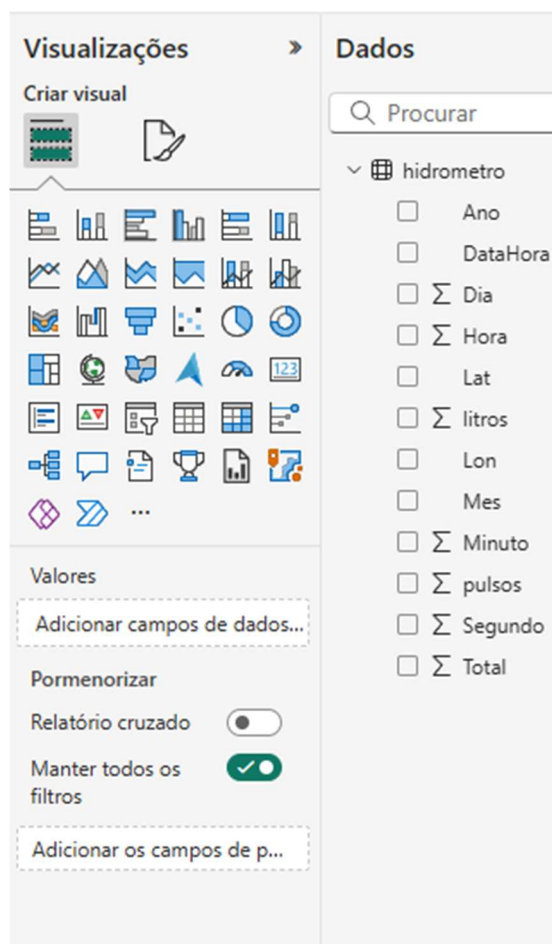


Figura 16 - Tabela *Hidrômetro* juntamente com as suas variáveis e o painel de visualizações do PowerBI, onde são realizados os gráficos.

A primeira métrica explorada consistiu na criação de um visual do tipo cartão, apresentando a soma acumulada da variável **Total**, correspondendo ao volume global de água medido desde o início da recolha de dados. Para tal, arrastou-se o campo **Total** para o campo de valores, tendo sido automaticamente agregado pelo Power BI como o valor máximo da variável **total**. Este indicador oferece, de forma imediata, uma métrica de desempenho acumulado do sistema como é possível identificar através da **Figura 17**.

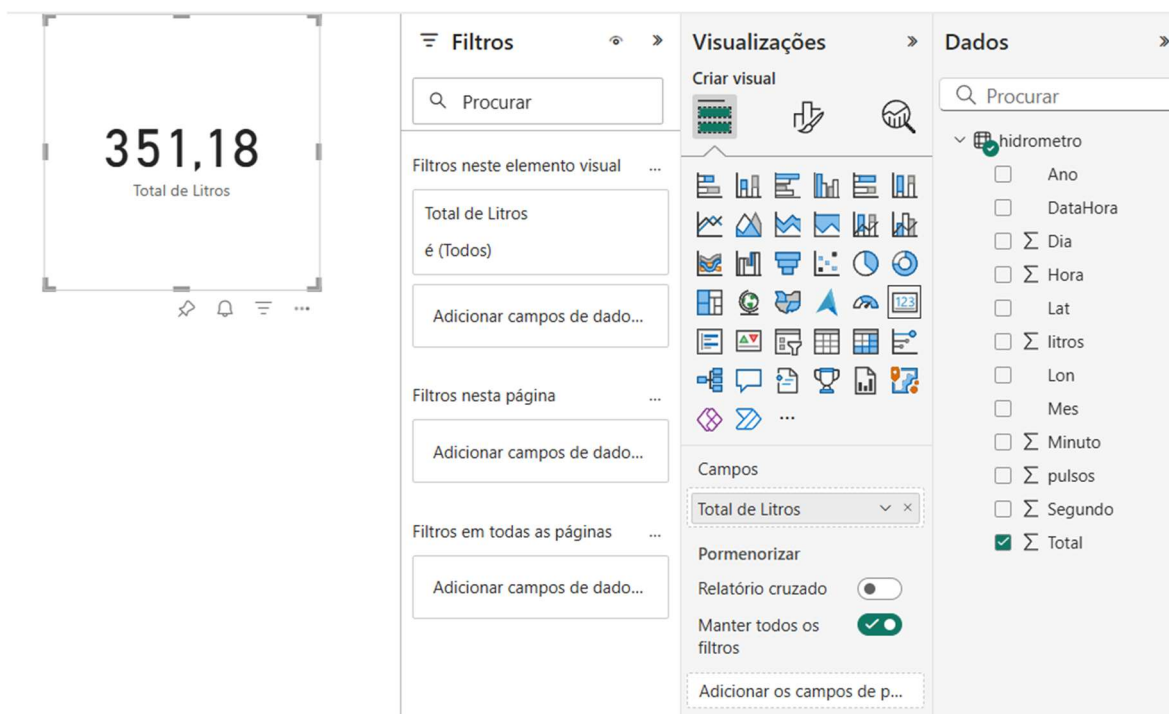


Figura 17 - Criação de um Visual do tipo cartão com a variável Total.

De seguida, procedeu-se à visualização espacial dos registos através da ativação do *ArcGIS Maps for Power BI* [21], funcionalidade que permite a georreferenciação dos dados com base nos campos de latitude (Lat) e longitude (Lon). Após o login na conta ArcGIS Online e a ativação de uma Key, os campos geográficos foram associados respetivamente aos eixos de Latitude (Y) e Longitude (X), permitindo a criação de um mapa interativo com suporte à navegação, zoom, e alteração de camada cartográfica visível na **Figura 18**.

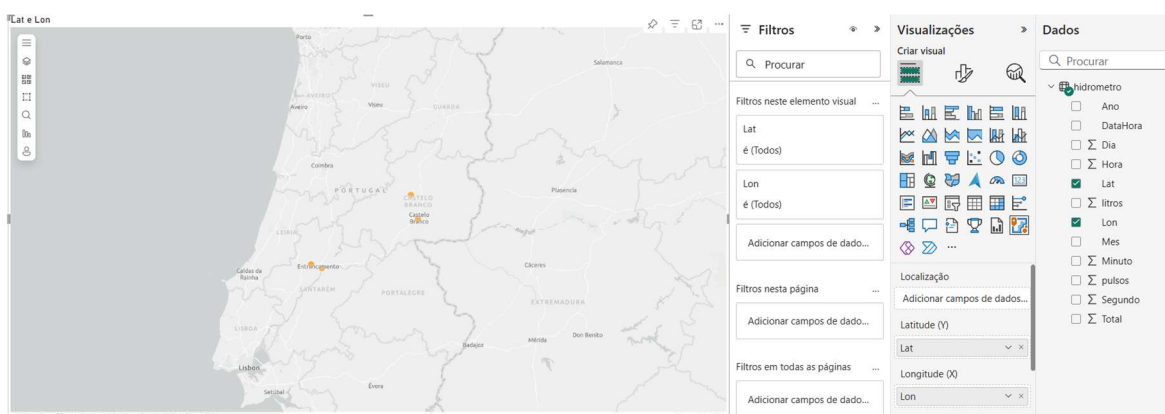


Figura 18 - Criação do ArcGIS Maps for Power BI.

Foram experimentados diferentes estilos de mapa base (nomeadamente *OpenStreetMap*, *Streets* e *Dark Gray Canvas*), tendo-se optado pelo estilo *OpenStreetMap* [22], em conjugação com uma camada do tipo mapa de calor, que permite identificar de forma visual as zonas com maior densidade de registos de envio de dados. Esta representação espacial potência a análise de padrões de utilização em diferentes locais de instalação, conforme ilustrado nas **Figuras 19 e 20**.

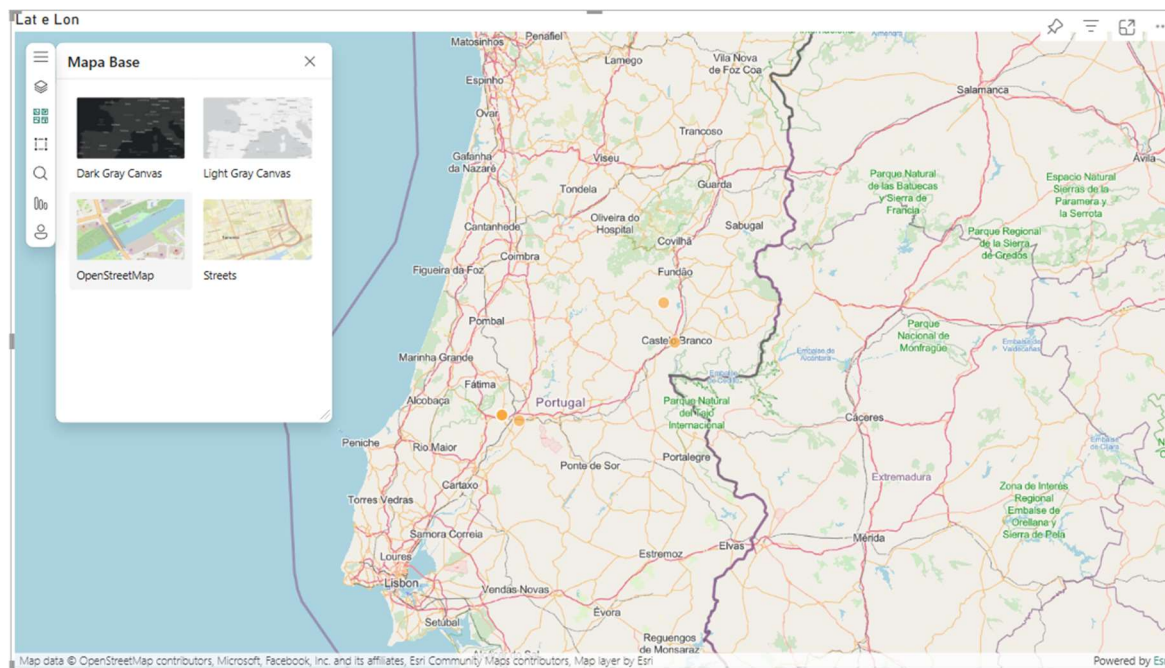


Figura 19 - Selecionar o Mapa Base *OpenStreetMap* no ArcGIS Maps for Power BI.

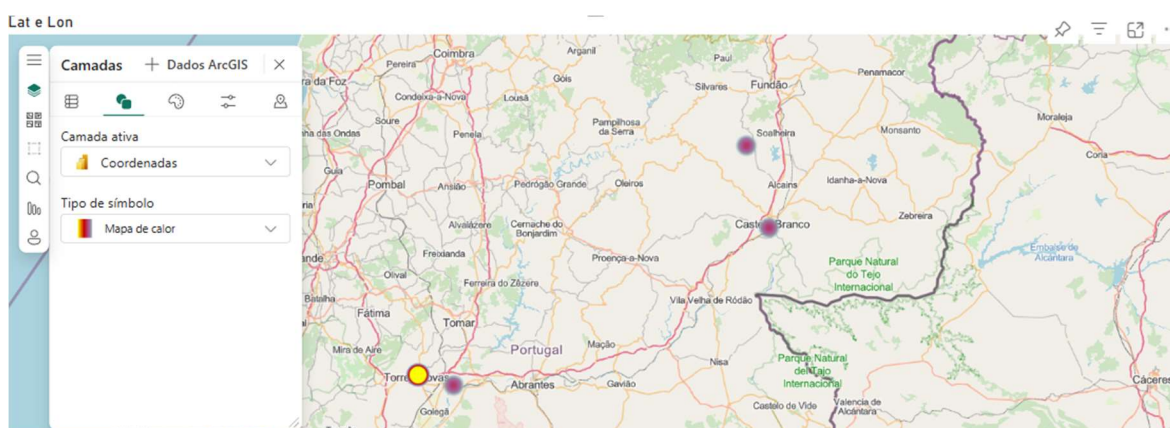


Figura 20 - Selecionar a camada de mapa de calor para a visualização das coordenadas.

Complementarmente, integrou-se no dashboard uma tabela dinâmica de dados, contendo os campos DataHora, litros, pulsos, Lat e Lon. Esta tabela oferece uma perspetiva cronológica e desagregada da informação recolhida, permitindo uma análise micro dos eventos registados, visível na **Figura 21**.

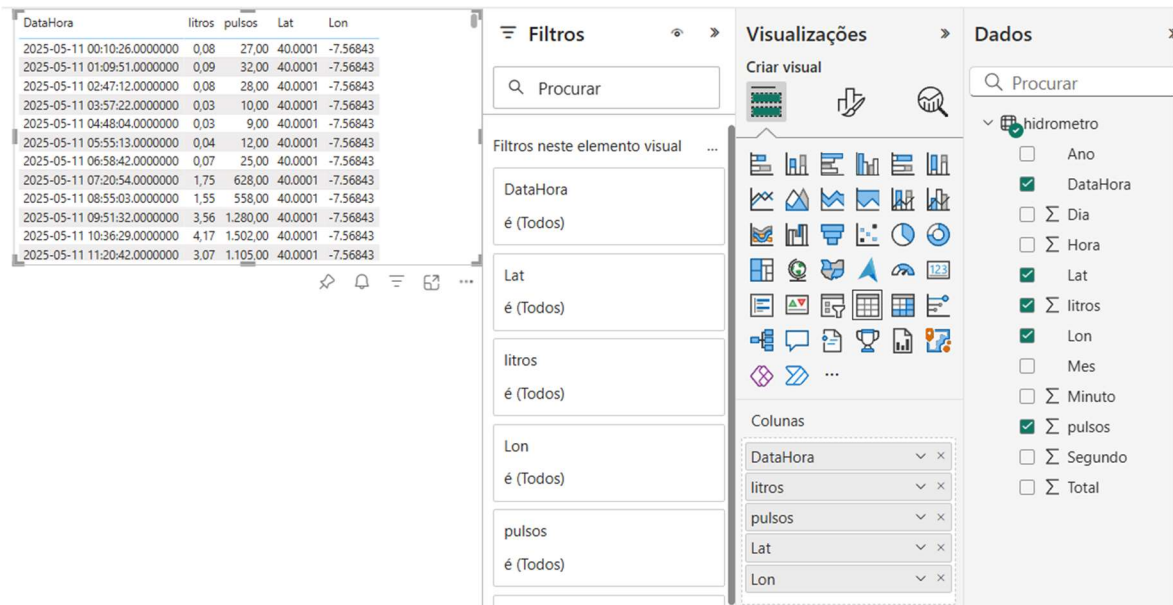


Figura 21 - Criação da tabela dinâmica.

No seguimento da tabela, foi desenvolvido um gráfico de colunas que representa a soma de litros por hora, com o objetivo de analisar os padrões de consumo ao longo do dia. Para isso, o campo *Hora* foi colocado no eixo das abcissas (X) e a agregação de *litros* no eixo das ordenadas (Y). Esta visualização possibilita observar, de forma clara, os períodos do dia com maior atividade hidráulica, podendo fornecer indícios relevantes para a gestão de recursos e identificação de anomalias como se verifica na **Figura 22**.

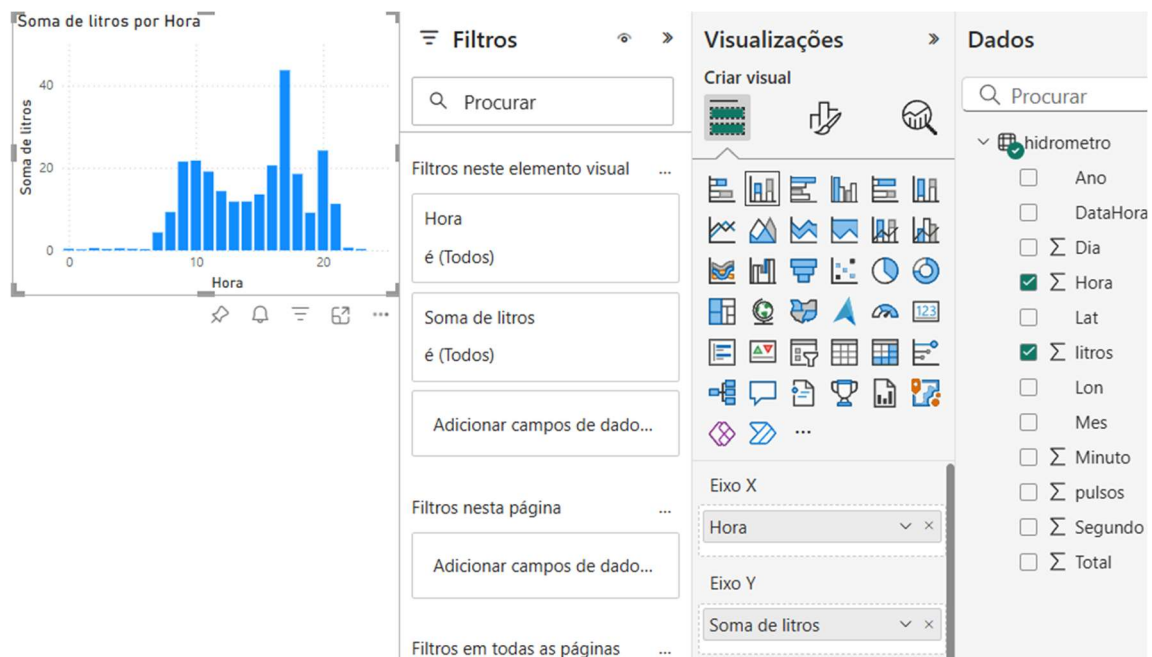


Figura 22 - Criação do gráfico de colunas com as variáveis *Litros* e *Hora*.

A representação gráfica adicional corresponde a um gráfico de linhas que apresenta a média de litros por minuto. Para a sua construção, arrastou-se o campo *Minuto* para o eixo X e agregou-se o campo *litros* com a função estatística da média no eixo Y. Esta visualização oferece uma perspetiva detalhada sobre as variações do consumo dentro de cada hora, possibilita a deteção de flutuações súbitas ou padrões de comportamento regulares ao longo do tempo como é apresentado na **Figura 23**. Tal nível de detalhe é essencial em contextos onde se pretende identificar picos de utilização associados, por exemplo, em eventos pontuais ou acionamentos automáticos de dispositivos.

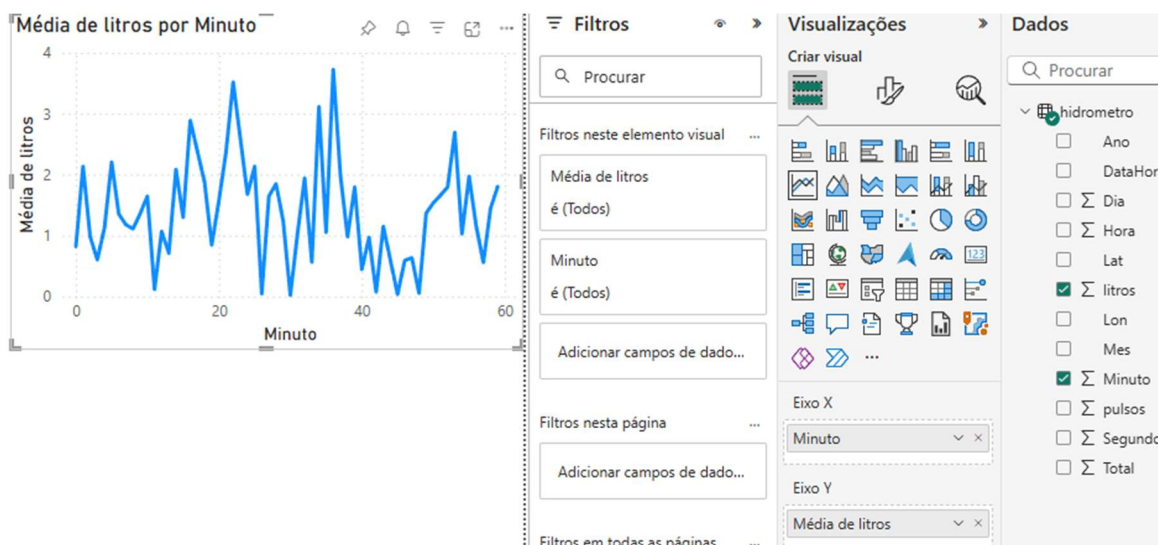


Figura 23 - Criação do gráfico de linhas com as variáveis *Minuto* e *Litros*.

De seguida, recorreu-se à criação de um gráfico de barras referente à soma de litros por ano como se verifica na **Figura 24**. Neste caso, utilizou-se o campo *Ano* no eixo das abscissas (X) e a soma do campo *litros* no eixo das ordenadas (Y). Esta visualização fornece uma leitura macroscópica da evolução do volume total de água monitorizado ao longo dos anos, permitindo identificar tendências de crescimento, redução ou estabilidade no consumo, sendo particularmente útil para análises comparativas anuais.

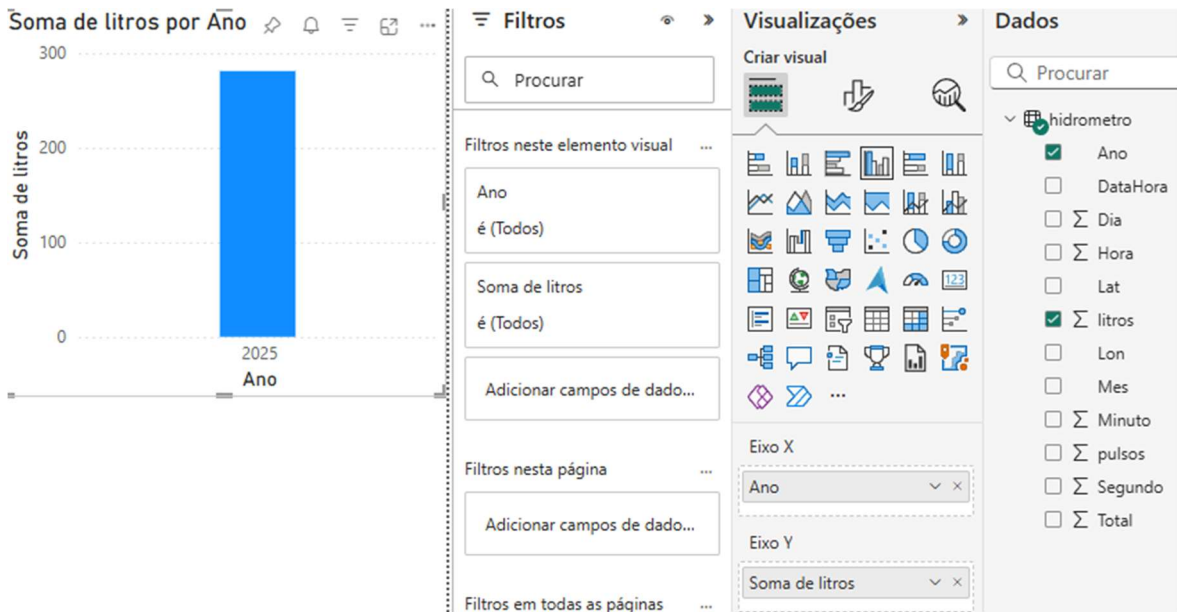


Figura 24 - Criação de um gráfico de barras com as variáveis *Ano* e *Litros*.

Complementando esta abordagem, foram desenvolvidos dois gráficos com base no campo *Dia*, respetivamente visíveis nas **Figuras 25 e 26**. O primeiro representa a média de litros por dia, enquanto o segundo apresenta a soma de litros por dia. Ambos assumem o campo *Dia* como eixo X, sendo que no primeiro a agregação aplicada ao campo *litros* é a média e no segundo é a soma. A análise da média permite observar padrões regulares de utilização diária, enquanto a análise da soma facilita a identificação de dias específicos com maiores volumes de água consumidos. Estes gráficos tornam-se cruciais para a compreensão do comportamento mensal da instalação, contribuindo para a deteção de anomalias ou regularidades.

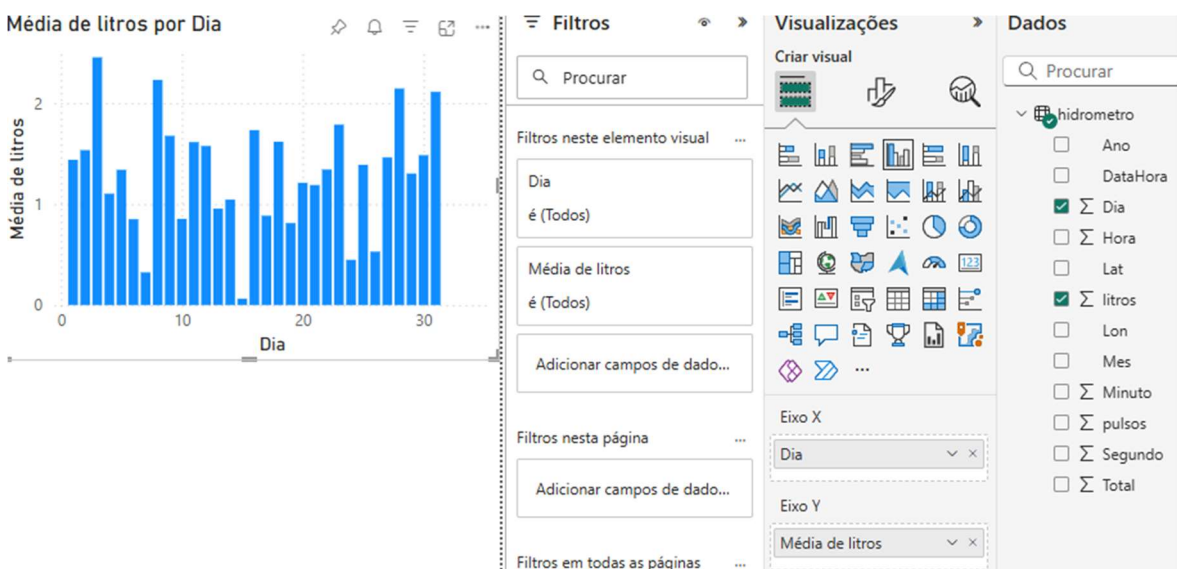


Figura 25 - Criação do gráfico de barras agrupado com as variáveis *Dia* e *Litros*.

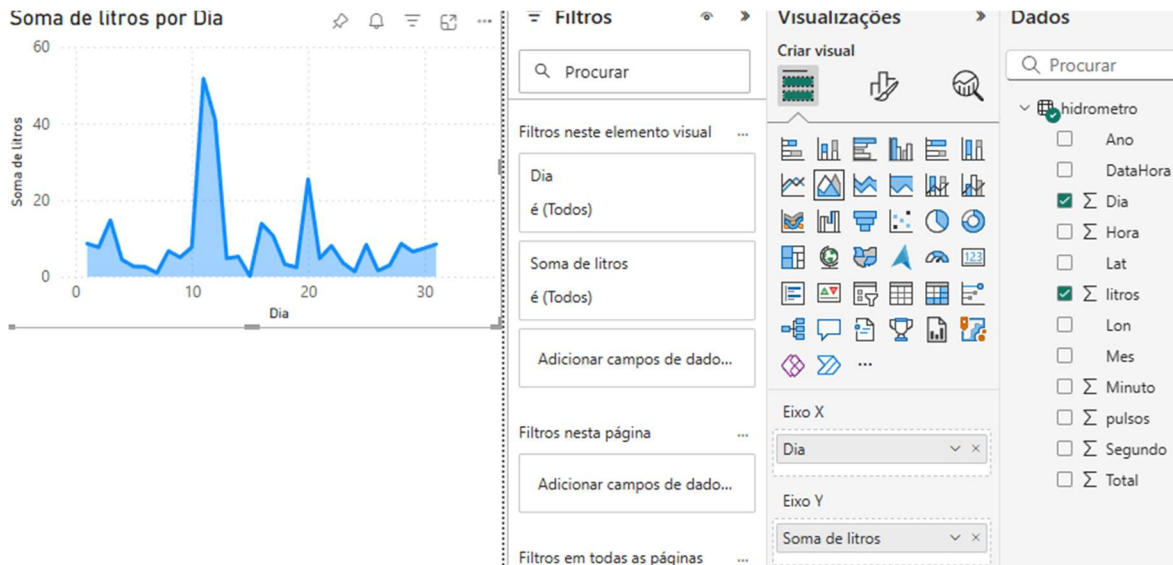


Figura 26 - Criação do gráfico de área com as variáveis *Dia* e *Litros*.

Foi também construído um gráfico de barras com a média de litros por mês, recorrendo ao campo *Mês* no eixo X e à média do campo *litros* no eixo Y, conforme ilustrado na **Figura 27**. Esta visualização tem como objetivo analisar a variação do consumo médio mensal, sendo particularmente relevante para o estudo de fenómenos de sazonalidade ou impactos de alterações operacionais ao longo do tempo.

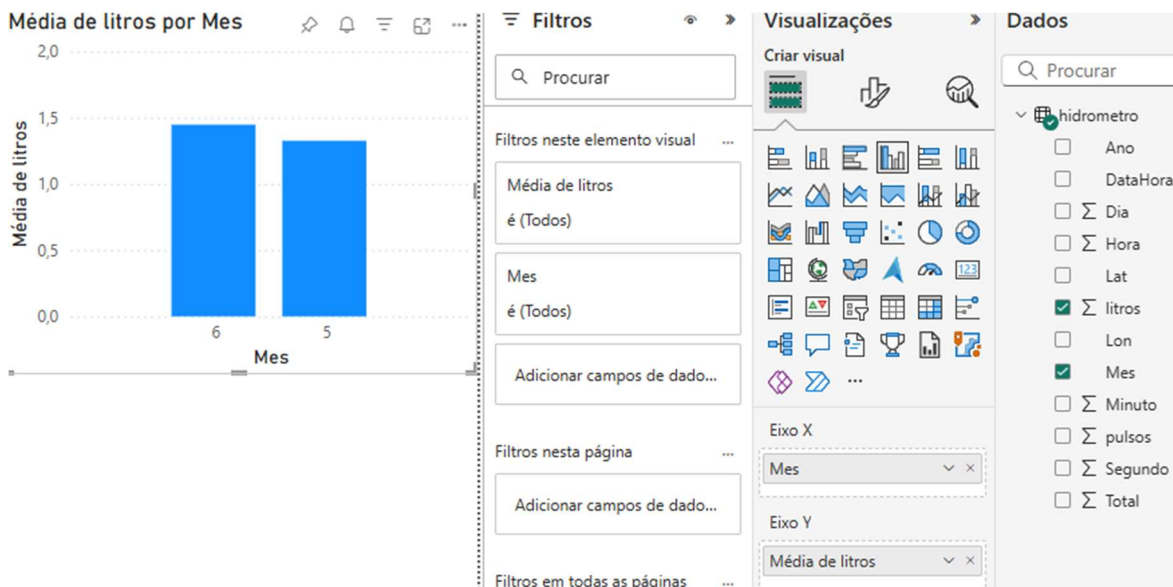


Figura 27 - Criação de um gráfico de barras com as variáveis *Mês* e *Litros*.

Por fim, a integração com o Power BI possibilitou a visualização dinâmica e interativa dos dados, permitindo uma análise contínua e fiável do comportamento hídrico da instalação experimental. A diversidade e a complementaridade dos gráficos implementados conferem ao dashboard uma robustez analítica essencial para a tomada de decisões e para o diagnóstico de padrões de funcionamento.

3 Testes de Validação e Avaliação de Desempenho

Os testes de validação e avaliação de desempenho, assumem um papel central na comprovação da fiabilidade e eficácia do protótipo desenvolvido. A validação foi conduzida com o intuito de aferir o correto funcionamento de todo o sistema, desde a recolha local de dados pelo sensor de fluxo até à sua representação visual em dashboards no Power BI, garantindo a integridade e coerência dos dados em cada etapa do pipeline tecnológico.

3.1 Objetivos e Metodologia

Com os testes realizados pretende-se essencialmente validar três dimensões críticas: (i) a funcionalidade do sistema, ou seja, se cada componente cumpre o seu papel conforme estruturado; (ii) a robustez e fiabilidade da comunicação, tendo em conta as particularidades da conectividade NB-IoT e à sensibilidade do módulo GPS; e (iii) a eficiência e desempenho, nomeadamente no que respeita ao tempo de transmissão, latência até à visualização dos dados e consumo energético implícito.

3.2 Procedimentos e Ambiente de Teste

Para a realização dos testes, foi criada uma bancada laboratorial simulando um cenário de consumo hídrico. O sensor FS300A foi ligado a uma conduta controlada de água, e os pulsos identificados foram processados pelo microcontrolador LILYGO T-SIM7080G-S3. Este, por sua vez, acumulava os dados na memória EEPROM, apresentava-os num display LCD e realizava o envio periódico via NB-IoT para o Azure IoT Hub, através do módulo SIM7080G utilizando o protocolo MQTT com encriptação TLS 1.2.

O ambiente de cloud incluiu a configuração de um IoT Hub no Azure, a criação de um job Stream Analytics para ingestão, transformação e encaminhamento dos dados, e a integração com o Power BI, onde foram desenvolvidos dashboards para visualização em tempo real de múltiplas métricas de análise (volume, tempo, localização).

3.3 Resultados dos Testes Funcionais

Durante os testes funcionais, foi possível confirmar que a leitura dos pulsos emitidos pelo sensor era processada corretamente, com uma relação calibrada de 360 pulsos por litro. Este valor foi utilizado para calcular o fluxo de água e o volume acumulado de litros, cuja evolução era visualmente apresentada no LCD I2C.

O armazenamento na EEPROM revelou-se eficaz. Mesmo após reinicializações do sistema, o valor do total acumulado de litros era corretamente recuperado, comprovando a persistência local dos dados e prevenindo a perda de informação em caso de falha energética.

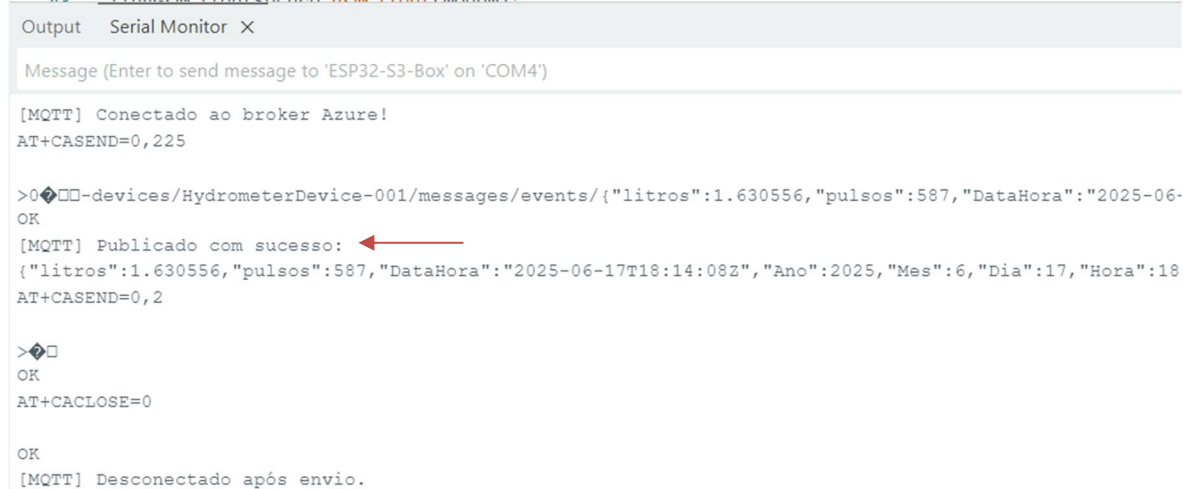
No que respeita à comunicação entre o dispositivo físico e a plataforma cloud, foi possível estabelecer com sucesso a ligação ao serviço Azure IoT Hub, como se comprova pelos registos apresentados na **Figura 28**, obtidos através do serial do microcontrolador. A autenticação do dispositivo foi efetuada por meio de um SAS Token, garantindo a segurança da sessão, e a transmissão dos dados processados localmente decorreu com a utilização do protocolo MQTT, encapsulado sob uma ligação TLS 1.2, assegurando a integridade e confidencialidade da informação.

A validação da receção dos dados por parte da infraestrutura cloud foi realizada através da ferramenta Azure IoT Explorer [23], cuja saída encontra-se ilustrada na **Figura 29**. Esta confirma inequivocamente a entrega bem-sucedida da mensagem ao broker, evidenciando o funcionamento correto do pipeline de publicação e o cumprimento dos requisitos definidos para o envio estruturado de dados em formato JSON.

```

40  const char *mqttUsername = "HydrometerIoTHub.azure-devices.net/HydrometerDevice-001/?api-version:
41  const char *mqttPassword = "SharedAccessSignature sr=HydrometerIoTHub.azure-devices.net%2Fdevice:
42
43  TinyGsmClientSecure_gsmClient(modem);

```



```

Output  Serial Monitor  X
Message (Enter to send message to 'ESP32-S3-Box' on 'COM4')

[MQTT] Conectado ao broker Azure!
AT+CASEND=0,225

>0[MQTT]-devices/HydrometerDevice-001/messages/events/{"litros":1.630556,"pulsos":587,"DataHora":"2025-06-
OK
[MQTT] Publicado com sucesso: ←
{"litros":1.630556,"pulsos":587,"DataHora":"2025-06-17T18:14:08Z","Ano":2025,"Mes":6,"Dia":17,"Hora":18
AT+CASEND=0,2

>[MQTT]
OK
AT+CACLOSE=0

OK
[MQTT] Desconectado após envio.

```

Figura 28 - Serial a enviar os dados com sucesso para o IoT Hub.

```
bruno [ ~ ]$ az iot hub monitor-events --hub-name HydrometerIoTHub --device-id HydrometerDevice-001
Dependency update (uamqp 1.6.6) required for IoT extension version: 0.26.0.
Continue? (y/n) -> y
Updating required dependency...
Update complete. Executing command...
Starting event monitor, filtering on device: HydrometerDevice-001, use ctrl-c to stop...
{
  "event": {
    "origin": "HydrometerDevice-001",
    "module": "",
    "interface": "",
    "component": "",
    "payload": "{\"litros\":0.222222,\"pulsos\":80,\"DataHora\":\"2025-06-17T18:13:46Z\",\"Ano\"
  }
}
{
  "event": {
    "origin": "HydrometerDevice-001",
    "module": "",
    "interface": "",
    "component": "",
    "payload": "{\"litros\":1.630556,\"pulsos\":587,\"DataHora\":\"2025-06-17T18:14:08Z\",\"Ano\"
  }
}
}
```

Figura 29 - IoT Hub a receber os dados em tempo real.

Após a publicação da mensagem no broker MQTT, o sistema encontra-se programado para proceder automaticamente à desconexão da sessão, libertando assim os recursos associados ao módulo NB-IoT. Esta abordagem otimiza o consumo energético do dispositivo, sendo particularmente relevante em contextos de monitorização remota com alimentação autónoma. A operação descrita encontra-se evidenciada na **Figura 30**, onde se observa no serial monitor a confirmação explícita da desconexão imediata após o envio bem-sucedido dos dados. Esta estratégia permite ainda preparar o dispositivo para futuras transmissões, mantendo o canal de comunicação disponível e estável, sem desperdício de recursos computacionais ou energéticos.

```
Output Serial Monitor X
Message (Enter to send message to 'ESP32-S3-Box' on 'COM4')

[MQTT] Conectado ao broker Azure!
AT+CASEND=0,225

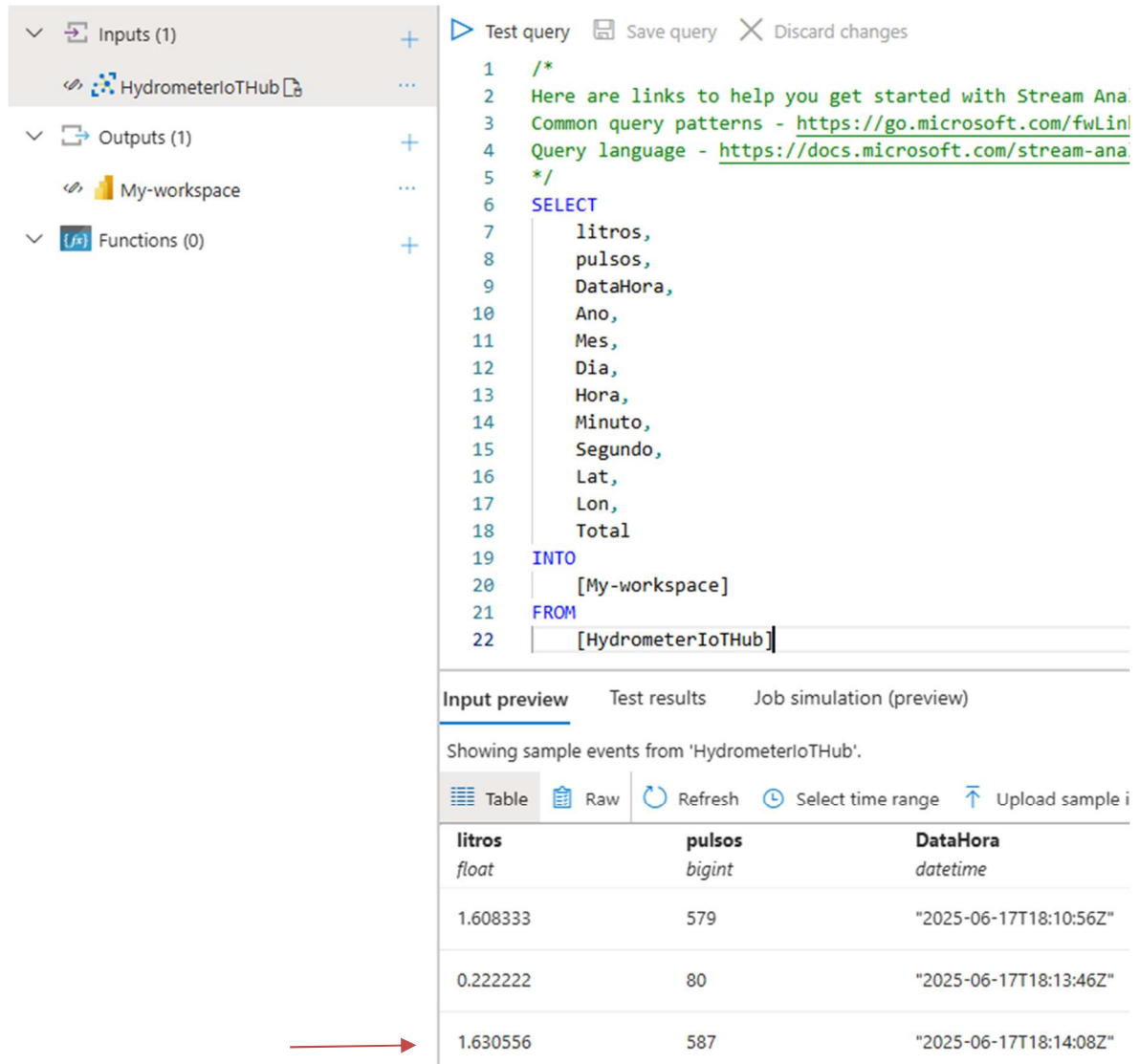
>0MQTT-devices/HydrometerDevice-001/messages/events/{"litros":1.630556,"pulsos":587,"DataHora":"2025-06-
OK
[MQTT] Publicado com sucesso:
{"litros":1.630556,"pulsos":587,"DataHora":"2025-06-17T18:14:08Z","Ano":2025,"Mes":6,"Dia":17,"Hora":18
AT+CASEND=0,2

>MQTT
OK
AT+CACLOSE=0

OK
[MQTT] Desconectado após envio. ←
```

Figura 30 - Fecho da ligação do protocolo MQTT após o envio de dados.

Por fim, a integração no Power BI demonstrou-se fluida e eficiente. A informação recolhida era transformada no Azure Stream Analytics como é visível na **Figura 31** e visualizada nos dashboards na **Figura 32**, com métricas como a soma e média de litros por hora, dia e mês, bem como a representação geográfica dos sensores com base nas coordenadas GPS recolhidas.



The screenshot displays the Azure Stream Analytics console. On the left, the 'Inputs' section shows 'HydrometerIoTHub'. The main area contains a SQL query editor with the following code:

```

1  /*
2  Here are links to help you get started with Stream Ana
3  Common query patterns - https://go.microsoft.com/fwlink/
4  Query language - https://docs.microsoft.com/stream-ana
5  */
6  SELECT
7      litros,
8      pulsos,
9      DataHora,
10     Ano,
11     Mes,
12     Dia,
13     Hora,
14     Minuto,
15     Segundo,
16     Lat,
17     Lon,
18     Total
19 INTO
20     [My-workspace]
21 FROM
22     [HydrometerIoTHub]

```

Below the query editor, the 'Input preview' tab is active, showing sample events from 'HydrometerIoTHub'. The data is presented in a table format with columns for 'litros', 'pulsos', and 'DataHora'.

litros	pulsos	DataHora
<i>float</i>	<i>bigint</i>	<i>datetime</i>
1.608333	579	"2025-06-17T18:10:56Z"
0.222222	80	"2025-06-17T18:13:46Z"
1.630556	587	"2025-06-17T18:14:08Z"

A red arrow points to the first row of data in the preview table.

Figura 31 - Azure Stream Analytics com dados recebidos do IoT Hub.

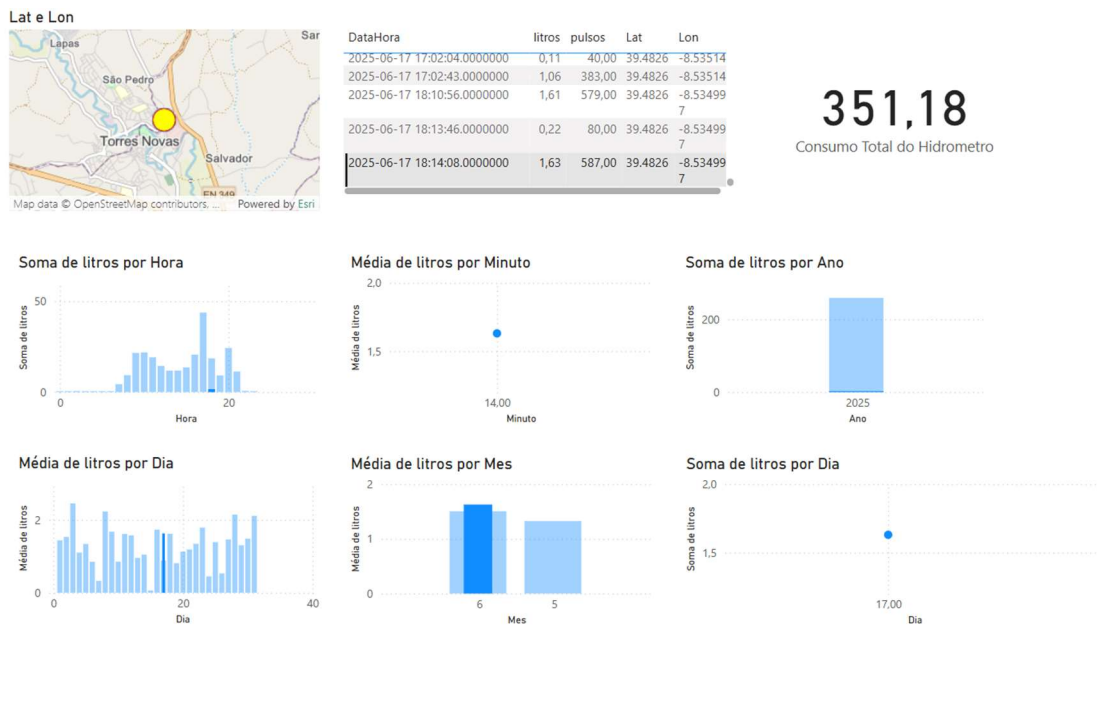


Figura 32 - Amostra no PowerBI resultante do encaminhamento do Azure Stream Analytics.

3.3.1 Análise de Desempenho

Em termos de desempenho, observou-se que o tempo médio entre a recolha de dados e o envio para o Azure situava-se entre 2 e 5 segundos, em condições de boa receção de rede. A latência entre o envio MQTT e a visualização no Power BI rondava os 10 a 15 segundos, variando consoante a carga da rede e a cadência dos pacotes enviados. Foram, contudo, identificadas duas limitações técnicas relevantes:

- Impossibilidade de fixação GPS e bloqueio do envio de dados:** Durante os testes, foi constatado que a operação do sistema depende diretamente da obtenção de coordenadas GPS válidas. Sempre que o módulo se encontrava em ambientes fisicamente obstruídos, como zonas interiores ou afastadas de janelas, a ausência de sinal GNSS impedia a fixação da localização. Esta falha não apenas resultava em coordenadas nulas, como também inviabilizava completamente o envio de dados para o Azure IoT Hub, uma vez que o firmware estava estruturado para apenas publicar o payload MQTT após obter latitude e longitude válidas. Nesses casos, o monitor serial evidenciava repetidamente a falha na tentativa de conexão com o broker, com o erro reportado como (MQTT ERRO Código: -2). A causa, neste cenário, não se prende com a rede NB-IoT em si, mas sim com a condição de dependência do GPS como pré-requisito à transmissão, impondo um bloqueio lógico à comunicação.

- **Erro de comunicação NB-IoT (Código -2):** observou-se o erro **MQTT ERRO Código: -2**, associado a falhas na abertura do socket TCP. Este comportamento foi associado à fraca intensidade de sinal da operadora, sendo mitigado com a realocação física do dispositivo para zonas com maior visibilidade e cobertura.

```
AT+CGNSINF                                OK
AT+CSSLCFG="sni",0,"hidhub.azure-devices.net"
+CGNSINF: 0,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,          OK
OK                                          AT+CAOPEN=0,0,"TCP","hidhub.azure-devices.net",8883
AT+CCLK?                                    +CAOPEN: 0,27
+CCLK: "25/06/16,18:15:58+04"            OK
                                           [MQTT ERRO] Código: -2
```

Figura 33 - Falhas que podem ocorrer no protótipo.

Apesar destas limitações pontuais, o sistema demonstrou resiliência, uma vez que, em condições apropriadas de sinal e recepção GPS, os dados eram enviados de forma consistente e sem perdas.

3.3.2 Validação Visual e Dados Observados

A validação foi complementada com evidências empíricas recolhidas no Power BI, onde os dados recebidos eram representados graficamente. Foram analisadas séries temporais do volume de água por hora e por dia, confirmando-se a consistência dos valores acumulados registados na EEPROM. A soma total exibida no dashboard ("Consumo Total do Hidrómetro") coincidia com os valores esperados de testes prolongados.



Figura 34 - Dashboards PowerBI.

As funcionalidades de análise geográfica foram igualmente verificadas. A presença de marcadores em pontos específicos de Portugal confirmava que, sempre que o módulo GPS estava operacional, as coordenadas eram enviadas e corretamente interpretadas, como é possível verificar na **Figura 34**.

Para além da simples visualização gráfica dos consumos, o sistema desenvolvido revela um elevado potencial na redução de perdas de água e na deteção precoce de fugas.

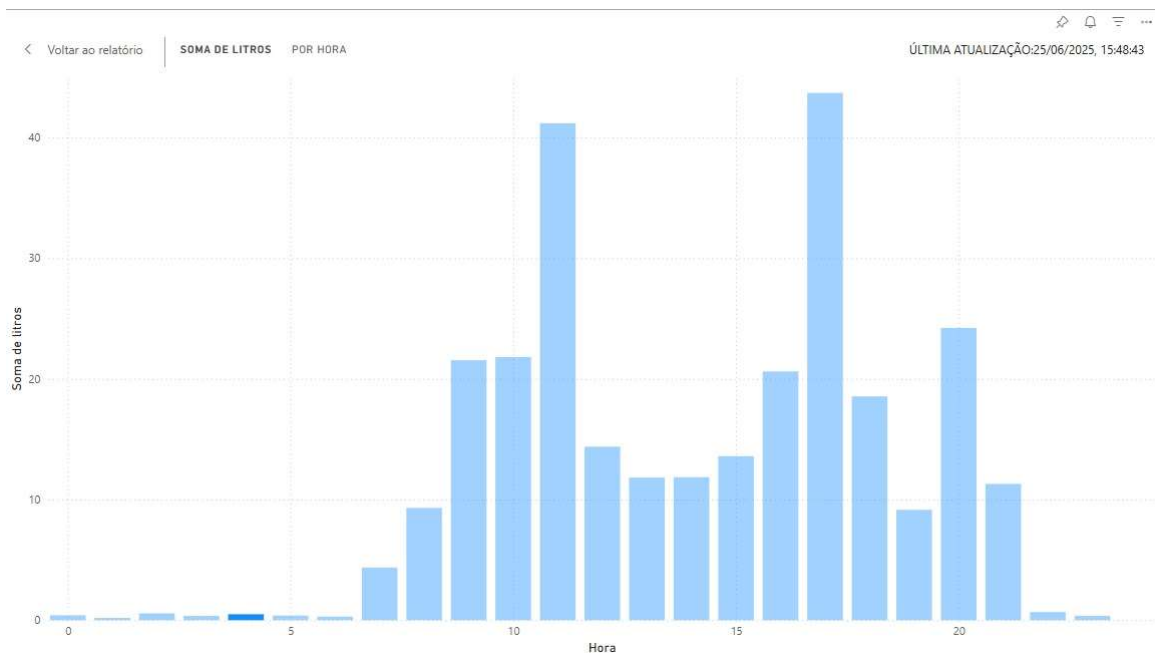


Figura 35 - Exemplo de um consumo anómalo.

Através destes gráficos temporais como é o caso da **Figura 35**, é possível identificar consumos anómalos fora do horário expectável, como por exemplo durante a madrugada, sugerindo a ocorrência de fugas ou utilizações não autorizadas. Esta informação, processada de forma automática e apresentada de forma clara, potencia uma intervenção proativa por parte dos responsáveis, reduzindo o tempo de reação e aumentando a eficácia da gestão operacional.

Adicionalmente, a georreferenciação automática por GPS, associada a cada envio de dados, permite uma localização precisa do dispositivo em campo, o que facilita significativamente a deteção e a resolução de anomalias. Esta integração entre recolha automática, análise contínua e visualização geográfica representa um avanço considerável face aos sistemas tradicionais, reforçando a utilidade prática da solução proposta para a melhoria da eficiência e sustentabilidade dos sistemas de abastecimento de água.

3.3.3 Conclusão da Validação

A análise técnica e os testes demonstraram que o protótipo cumpre de forma satisfatória com os requisitos funcionais, operacionais e de integração definidos nos objetivos do projeto. A cadeia completa de monitorização desde a aquisição física dos dados até à sua visualização em dashboards revelou-se fiável, eficiente e tecnologicamente robusta.

A arquitetura adotada mostrou ser escalável, podendo facilmente ser replicada ou estendida a novos sensores e cenários de aplicação. As limitações encontradas são compreensíveis na medida das características físicas dos componentes utilizados.

Neste sentido, considera-se que o sistema constitui uma solução tecnicamente sólida, com um elevado potencial de aplicação em contextos reais de monitorização de água, representando um contributo efetivo para a digitalização de infraestruturas de gestão de água, alinhado com os princípios de eficiência, sustentabilidade e transformação digital do setor.

4 Análise de Custos da Solução Proposta

A análise de custos constitui um elemento central na avaliação da viabilidade económica do sistema proposto, permitindo aferir o seu potencial de replicação e operacionalização em contextos reais. Esta secção apresenta uma estimativa detalhada dos custos associados ao desenvolvimento, operação e manutenção do protótipo, com base em valores de mercado e serviços utilizados no âmbito do projeto.

4.1 Custos de Hardware

A **Figura 36** apresenta os principais componentes físicos utilizados na construção do protótipo, com os respetivos preços unitários aproximados:

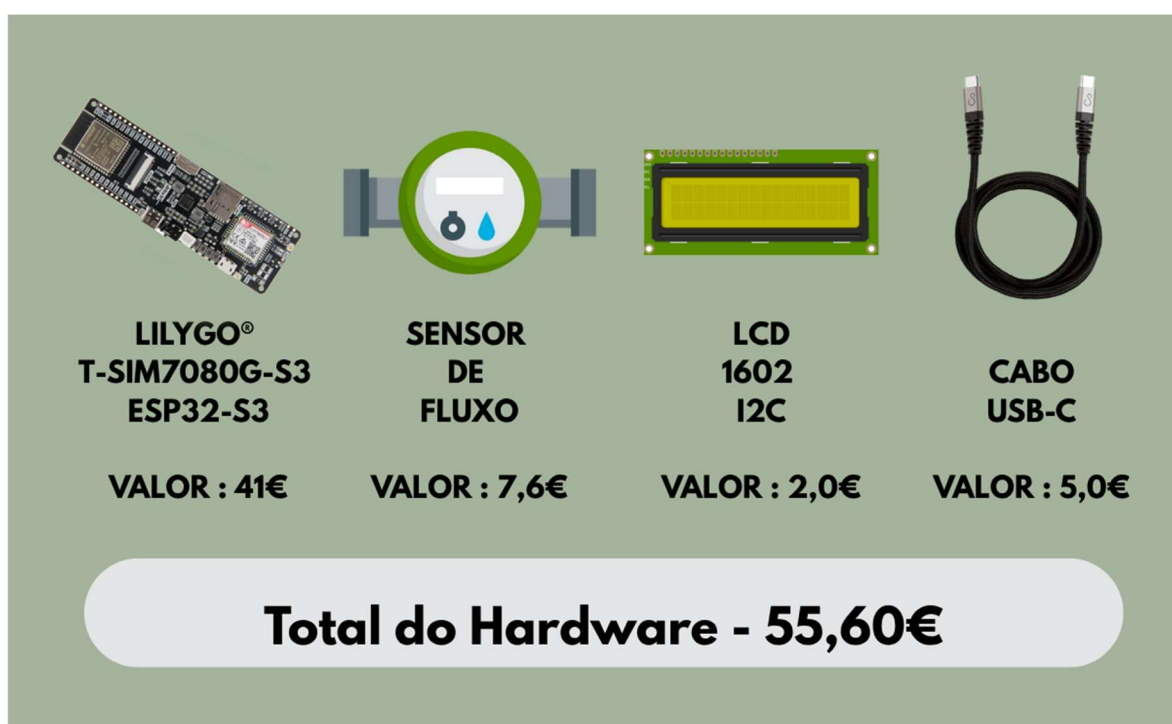


Figura 36 - Custo total do hardware da solução. [24] [25]

Estes custos refletem valores unitários de fornecedores online, poderão ser otimizados em contextos de produção em escala, por via da aquisição em lote ou por substituição de novos componentes por equivalentes de menor custo.

4.2 Custos com serviços de cloud e comunicação

No âmbito deste projeto, foi utilizada a plataforma Microsoft Azure para o processamento e disponibilização dos dados recolhidos como podemos visualizar na **Figura 37**. A estrutura de serviços incluiu:

- Azure IoT Hub (Tier Basic): responsável pela receção de mensagens via MQTT;
- Azure Stream Analytics: processamento dos dados em tempo real;
- Power BI: visualização e análise interativa.

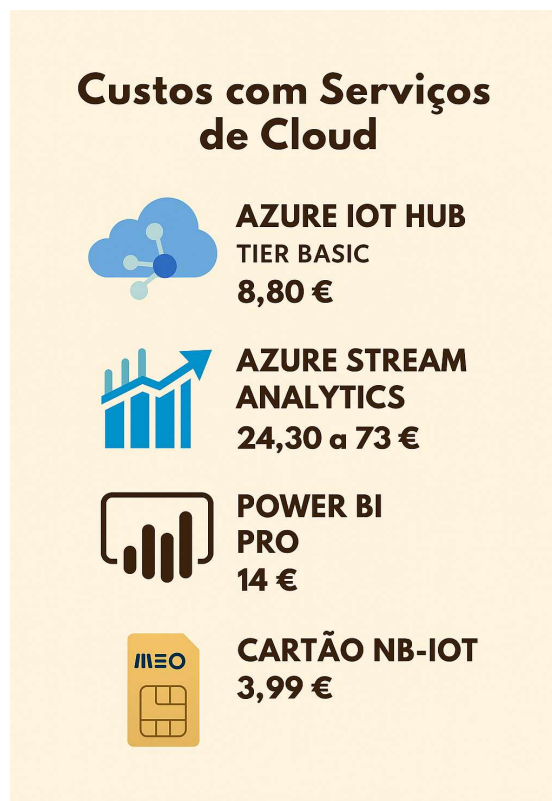


Figura 37 - Custos com Serviços de Cloud e Comunicação. [26] [27] [28]

A estimativa para o Azure Stream Analytics teve por base a tarifa atual de 0,11 USD por hora por SU (Streaming Unit). Considerando um cenário de produção com a execução do job apenas 8 horas por dia, o custo mensal ronda os 24,30 €, valor substancialmente inferior ao custo em regime contínuo (24/7), o qual ultrapassaria os 73 € mensais.

A subscrição do Azure IoT Hub (Tier Basic) permite o envio de até 400.000 mensagens mensais [29] e a associação de múltiplos devices ao Hub correspondente, garantindo uma infraestrutura escalável e económica.

Foi utilizado um cartão NB-IoT da MEO, adequado para ligações estáveis e de baixo consumo energético. O plano escolhido oferece 300 MB, 50 SMS e 50 chamadas por mês.

Todos os custos apresentados na **Figura 37** são mensais.

4.3 Comparação de custos com soluções atualmente utilizadas nos Serviços Municipalizados

Com o intuito de avaliar a viabilidade técnica e económica da solução desenvolvida neste projeto, torna-se essencial realizar uma comparação direta com os equipamentos atualmente utilizados pelos Serviços Municipalizados. Para tal, consideraram-se três contextos distintos de aplicação: uso doméstico, ambiente comercial/industrial e Zona de Medição e Controlo (ZMC) demonstrado na **Figura 38**.

Uso Doméstico	Comercial/Industrial		ZMC
			
Axioma Qalcosonic W1	Itron Flostar M DN40	Arad Octave DN40	Arad Octave DN100
71.00€	205.87€	580.00€	1.386,00€

Figura 38 - Contadores existentes na infraestrutura dos SMCB.

No setor doméstico, a solução adotada consiste na instalação de contadores ultrassónicos, com destaque para o modelo **Axioma Qalcosonic W1**, que comunica por LoRa. A transmissão de dados ocorre com uma periodicidade pré-definida de 12 em 12 horas, e cada unidade apresenta um custo aproximado de **71,00€**.

Já em ambientes de natureza comercial ou industrial, os SMCB recorrem a dois tipos principais de contadores. O primeiro é o **Itron Flostar M DN40**, um contador do tipo monojato, cujo custo por unidade é de **205,87€**. O segundo é o **Arad Octave DN40**, um contador ultrassónico, com um custo substancialmente mais elevado de **580,00€**. Em ambos os casos, a recolha de dados depende de dispositivos datalogger externos, conectados através de sensores de impulsos ou cabos emissores de sinal.

Nas Zonas de Medição e Controlo (ZMC), onde se exige maior precisão na monitorização e controlo do consumo, é utilizado o **Arad Octave DN100**, igualmente com tecnologia ultrassónica. Este equipamento é também acoplado a um datalogger, e o seu custo unitário ascende aos **1.386,00€**, refletindo o seu nível de sofisticação e robustez.

Importa sublinhar que, em todos os casos, a georreferenciação dos dispositivos é realizada manualmente no momento da instalação, o que implica maior complexidade operacional, dependência de técnicos no terreno e suscetibilidade a erros de localização. Em contraste, a solução tecnológica desenvolvida neste projeto integra geolocalização automática via GPS, proporcionando maior precisão, automatização e eficiência na etapa de registo e configuração inicial do dispositivo.

4.4 Considerações finais

Comparativamente às soluções atualmente adotadas pelos Serviços Municipalizados, a solução tecnológica proposta no âmbito deste projeto evidencia um conjunto de vantagens substanciais, tanto do ponto de vista económico como funcional.

Em primeiro lugar, ao nível do hardware, observa-se uma diferença expressiva nos custos associados: enquanto os contadores atualmente em utilização, nomeadamente os modelos comerciais e industriais como o *Itron Flostar M DN40*, o *Arad Octave DN40* e o *Arad Octave DN100*, apresentam valores unitários que oscilam entre 205,87 € e 1.386,00 €, a solução desenvolvida neste projeto, composta por um microcontrolador com conectividade NB-IoT, sensor de fluxo e ecrã LCD, tem um custo total de apenas 55,60 €. Esta diferença traduz-se numa redução significativa de investimento inicial, o que se torna particularmente relevante em contextos de aplicação em larga escala.

No que concerne à infraestrutura de comunicação e análise, a proposta assenta numa arquitetura em serviços de cloud computing, nomeadamente através do Azure IoT Hub, Azure Stream Analytics e Power BI. Esta abordagem permite escalabilidade, monitorização remota em tempo real, e integração automática com ferramentas de visualização analítica, eliminando grande parte do trabalho manual que, nas soluções convencionais, é realizado através da recolha local de dados por dataloggers. Para além de aumentar a eficiência operacional, esta integração facilita também a interoperabilidade com outras plataformas ou sistemas de gestão.

Adicionalmente, a implementação da geolocalização automática via GPS constitui um avanço importante face aos métodos tradicionais de georreferenciação manual utilizados atualmente. Este recurso não só simplifica o processo de instalação e mapeamento dos dispositivos, como também assegura uma maior precisão na localização, crucial para o planeamento e manutenção de infraestruturas de abastecimento.

Assim, do ponto de vista económico e estratégico, a solução apresentada revela-se altamente competitiva, representando uma oportunidade concreta de modernização tecnológica com redução de custos operacionais, melhoria da eficiência e valorização dos dados em tempo real, o que poderá beneficiar de forma significativa os Serviços Municipalizados no seu processo de transição digital.

5 Conclusões e Trabalho Futuro

No presente capítulo são descritas as conclusões resultantes da realização do projeto assim como propostas futuras do trabalho apresentado.

5.1 Conclusões

Reduzir o desperdício de água não é apenas uma prioridade técnica, mas uma responsabilidade ambiental e social, com implicações diretas na sustentabilidade dos recursos hídricos e na resiliência das comunidades. Cada litro poupado representa um avanço no combate à escassez hídrica e contribui para a construção de sistemas de gestão mais eficientes, justos e preparados para os desafios do futuro.

Este projeto constitui um ponto de partida para enfrentar a complexidade associada à medição imprecisa e à ineficiência na gestão do consumo de água. Tecnologias emergentes como a Internet das Coisas (IoT) e a Narrowband IoT (NB-IoT) demonstram grande potencial no apoio à monitorização remota, à deteção de anomalias e à otimização da utilização dos recursos hídricos.

O principal objetivo deste trabalho foi propor, implementar e validar uma solução tecnológica que permitisse melhorar significativamente a precisão da medição do consumo de água e a resposta a eventuais desperdícios, com base numa infraestrutura de baixo custo e elevada escalabilidade. Nesse sentido, o projeto desenvolveu uma arquitetura completa, baseada em **sensores** inteligentes, comunicação NB-IoT, armazenamento em cloud e visualização em dashboards interativos.

Os principais contributos deste Projeto II incluem a integração de um sistema funcional baseado em NB-IoT, capaz de recolher dados de consumo de água através de um sensor de fluxo, complementado por um display LCD para leitura local. Destaca-se ainda a inserção e visualização dos dados na plataforma Power BI, incluindo a criação de dashboards interativos com informação georreferenciada.

Com base nos resultados observados até agora, o sistema demonstrou um grande potencial para modernizar a gestão de recursos hídricos. A sua capacidade de recolher, armazenar, processar e enviar dados com precisão, associada a ferramentas de análise e visualização como o Power BI, aponta para uma solução robusta, escalável e adaptável a diferentes contextos. A continuidade deste projeto poderá consolidar a tecnologia NB-IoT como um pilar estratégico para uma gestão hídrica mais inteligente, eficiente e sustentável.

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 técnicos significativos, que deverão ser considerados para futuras otimizações e expansões da solução.

Durante a fase de implementação, um dos principais obstáculos foi a integração do display LCD QAPASS, que utiliza comunicação via I2C. Este barramento já se encontrava ocupado pelas entradas principais da PMU, impossibilitando o uso direto do LCD. Para contornar essa limitação, foi necessário criar um segundo barramento virtual I2C exclusivo para o display, o que exigiu ajustes no firmware. Esta solução permitiu a operação simultânea da PMU e do LCD, sem interferência funcional, mas envolveu complexidade extra no desenvolvimento.

Outro desafio técnico relevante foi a incorporação do mapa georreferenciado no Power BI, utilizando dados de latitude e longitude recolhidos via GPS. A conversão e tratamento adequado destes dados, de forma a serem lidos corretamente pelo serviço de visualização da Microsoft, implicou diversas etapas de normalização e adaptação, devido à sensibilidade do formato e das coordenadas no ambiente do Power BI.

A integração com a Azure Cloud, embora bem-sucedida, também apresentou desafios, especialmente relacionados à autenticação via MQTT e à configuração correta do dispositivo no IoT Hub. Além disso, a estabilidade da ligação NB-IoT e as particularidades do cartão SIM dedicado (necessário para o uso exclusivo da tecnologia NB-IoT) exigiram testes específicos para garantir uma comunicação robusta e contínua.

Em relação ao trabalho futuro, planeia-se a integração de uma bateria 18650 com uma célula fotovoltaica, permitindo testar o sistema em ambientes rurais com bom acesso à energia solar. Este passo será fundamental para validar a autonomia energética do dispositivo e a sua capacidade de operação contínua fora de ambientes urbanos.

Outra prioridade será o desenvolvimento de uma interface gráfica mais intuitiva e acessível para técnicos, com foco na clareza e facilidade de navegação dos dados recolhidos. Pretende-se configurar filtros e alertas interativos que permitam uma monitorização eficiente e, ao mesmo tempo, notificar automaticamente eventuais anomalias ou padrões de consumo atípicos.

Complementarmente, considera-se relevante a futura exploração de outras tecnologias de comunicação de baixo consumo, como o LoRa, especialmente para zonas onde a cobertura NB-IoT seja limitada. A possibilidade de incorporar mecanismos de edge computing também poderá ser estudada, com o intuito de reduzir a latência, aliviar a infraestrutura cloud e tornar o sistema mais resiliente.

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] P. M. S. R. a. 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.
- [6] “T-SIM7080G S3,” [Online]. Available: <https://lilygo.cc/products/t-sim7080-s3>. [Accessed 21 Maio 2025].
- [7] “SIM7080G,” [Online]. Available: <https://www.simcom.com/product/SIM7080G.html>. [Accessed 21 Maio 2025].
- [8] “Azure IoT Hub,” [Online]. Available: <https://azure.microsoft.com/en-us/products/iot-hub>. [Accessed 21 Maio 2025].
- [9] “Water Flow Sensor (FS300A),” [Online]. Available: <https://circuits-elec.com/products/water-flow-sensor-fs300a>. [Accessed 23 Maio 2025].
- [10] “Display I2C LCD 1602A,” [Online]. Available: https://www.robotique.tech/robotics/display-text-on-the-i2c-lcd-1602a-display-with-arduino/#google_vignette. [Acedido em 23 Maio 2025].
- [11] “MQTT: The Standard for IoT Messaging,” [Online]. Available: <https://mqtt.org/>. [Acedido em 23 May 2025].
- [12] “Azure Stream Analytics,” [Online]. Available: <https://azure.microsoft.com/en-us/products/stream-analytics>. [Accessed 27 Maio 2025].
- [13] “Power BI,” [Online]. Available: <https://www.microsoft.com/pt-pt/power-platform/products/power-bi?market=pt>. [Accessed 27 Maio 2025].

- [14] W. Y. F. L. X. H. and W. H. , *A Survey on the Edge Computing for the Internet of Things*, 2017.
- [15] “ESP32-S3,” [Online]. Available: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32-s3>. [Accessed 27 Maio 2025].
- [16] “IoT Connect,” [Online]. Available: <https://www.meo.pt/empresas/solucoes/iot/tools/iot-connect>. [Acedido em 27 Maio 2025].
- [17] “Usar o ecrã LCD 16x2 com Arduino 1602A,” [Online]. Available: <https://www.arduinoportugal.pt/usar-pantalla-lcd-16x2-arduino-1602a/>. [Accessed 27 Maio 2025].
- [18] “T-SIM7080G S3,” [Online]. Available: <https://github.com/Xinyuan-LilyGO/LilyGo-T-SIM7080G/tree/master>. [Accessed 27 May 2025].
- [19] “Introducing JSON,” [Online]. Available: <https://www.json.org/json-en.html>. [Accessed 21 Maio 2025].
- [20] “Arduino IDE 2.3.6,” [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/software/>. [Acedido em 27 Maio 2025].
- [21] “Criar mapas do ArcGIS no Power BI,” [Online]. Available: <https://learn.microsoft.com/pt-pt/power-bi/visuals/power-bi-visualizations-arcgis>. [Acedido em 1 Junho 2025].
- [22] “OpenStreetMap,” [Online]. Available: <https://www.openstreetmap.org/>. [Accessed 1 Maio 2025].
- [23] “Azure IoT Explorer,” [Online]. Available: <https://github.com/Azure/azure-iot-explorer>. [Accessed 1 Maio 2025].
- [24] “Sensor Fluxo FS300A,” [Online]. Available: <https://pt.aliexpress.com/item/32818294467.html>. [Accessed 25 Junho 2025].
- [25] “LILYGO® T-SIM7080G-S3 ESP32-S3,” [Online]. Available: <https://pt.aliexpress.com/item/1005005188988179.html?src=google>. [Accessed 24 Junho 2025].
- [26] “Preço IoT Hub,” [Online]. Available: <https://azure.microsoft.com/pt-pt/pricing/details/iot-hub/?cdn=disable>. [Accessed 24 Junho 2025].
- [27] “Preço PowerBI,” [Online]. Available: <https://www.microsoft.com/en-us/power-platform/products/power-bi/pricing>. [Accessed 24 Junho 2025].

- [28] “Preço Stream Analytics,” [Online]. Available: <https://azure.microsoft.com/en-us/pricing/details/stream-analytics/?cdn=disable>. [Acedido em 24 Junho 2025].
- [29] “IoT Hub Limits - Github,” [Online]. Available: <https://github.com/MicrosoftDocs/azure-docs/blob/main/includes/iot-hub-limits.md>. [Acedido em 25 Junho 2025].

Anexo 1- Artigo Científico

*Remote Monitoring of Water Consumption Using NB-IoT and Cloud-Based Visualization:
A Case Study from Castelo Branco, Portugal*

Autores:

Bruno Proença, Diogo Canoso, Eurico Ribeiro Lopes, Luís M. Barata
Submetido à revista Springer Water Resources Management (EWRA)

*Nota: Este artigo encontra-se em processo de submissão e serve de complemento técnico
ao presente relatório.*

Remote Monitoring of Water Consumption Using NB-IoT and Cloud-Based Visualization: A Case Study from Castelo Branco, Portugal

Bruno Proença¹, Diogo Canoso¹, Eurico Ribeiro Lopes¹,
Luís M. Barata^{1,2*}

¹Escola Superior de Tecnologia, Instituto Politécnico de Castelo Branco, Castelo Branco, Portugal.

²Instituto de Telecomunicações, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal.

*Corresponding author(s). E-mail(s): luis.barata@ipcb.pt;
Contributing authors: bruno.proenca@ipcbcampus.pt;
diogo.canoso@ipcbcampus.pt; eurico@ipcb.pt;

Abstract

Non-revenue water (NRW) continues to be a critical challenge for urban water utilities, particularly in regions where aging infrastructure and the lack of real-time monitoring contribute to significant resource losses. With recent advancements in Internet of Things (IoT) technologies and the growing availability of Narrowband-IoT (NB-IoT) connectivity, new opportunities have emerged for implementing remote, energy-efficient, and scalable smart metering solutions. This paper presents the design, implementation, and evaluation of a low-cost prototype for real-time water consumption monitoring, integrating an NB-IoT-enabled microcontroller, a hall-effect flow sensor, GPS, and a cloud-based architecture using Microsoft Azure. The system successfully transmits telemetry via MQTT over TLS, processes data using Azure Stream Analytics, and visualizes consumption patterns through Power BI dashboards. Field tests demonstrated average latencies below 15 seconds, persistent local data retention, and overall reliability in data acquisition and delivery. Despite minor limitations related to GPS acquisition and signal coverage, the solution proved to be a viable, scalable foundation for intelligent water management, supporting broader goals of efficiency, sustainability, and smart city development.

Keywords: Smart water metering, NB-IoT, IoT, Azure, Cloud monitoring, Water resources management

1 Introduction

Efficient water management is vital to combat urban resource loss. In Portugal, more than 27% of potable water is lost before consumption. This loss, commonly referred to as non-revenue water (NRW), represents not only a financial deficit for utilities but also a threat to sustainability, especially in regions facing water scarcity or ageing infrastructure.

According to the United Nations, by 2025 approximately 1.8 billion people will be living in countries or regions with absolute water scarcity, and two-thirds of the world population could be under stress conditions [1]. In this context, digital water management has emerged as a key enabler to achieving Sustainable Development Goal 6 (Clean Water and Sanitation) by ensuring better monitoring, control, and planning of water resources.

Conventional water metering systems, typically based on mechanical devices, present substantial limitations in terms of accuracy, responsiveness, and data integration [2]. They are often unable to detect low-flow events, suffer from mechanical wear, and lack the capacity to provide real-time data. These deficiencies lead to undetected leaks, inefficient billing systems, and a general lack of situational awareness by service providers.

Recent advancements in the Internet of Things (IoT), particularly in low-power wide-area network (LPWAN) technologies such as Narrowband-IoT (NB-IoT), have opened new opportunities in the field of remote environmental monitoring. NB-IoT offers reliable long-distance communication with minimal energy consumption, making it well-suited for applications like smart metering in geographically dispersed or infrastructure-constrained areas.

In parallel, the proliferation of cloud computing platforms has transformed how sensor data can be processed and visualized. Platforms such as Microsoft Azure enable seamless ingestion of real-time telemetry, support secure device provisioning and communication, and offer powerful analytics services like Azure Stream Analytics and Power BI. When combined with embedded edge computing and energy-efficient communication modules, they form the backbone of cyber-physical systems tailored to smart cities.

This paper presents the design, implementation, and evaluation of a low-cost prototype that integrates an NB-IoT-enabled microcontroller, flow sensors, GPS, and cloud services to achieve accurate, real-time water metering and visualization. The system is demonstrated in a simulated environment based on local infrastructure constraints from the Castelo Branco region of Portugal, in collaboration with the Municipal Water Services of Castelo Branco, offering insights into deployment feasibility and performance under real-world conditions.

2 Related Work and Technological Context

Recent research in smart water monitoring has focused on the integration of Low Power Wide Area Network (LPWAN) technologies with cloud-based infrastructures to address challenges in water consumption tracking, quality monitoring, and network

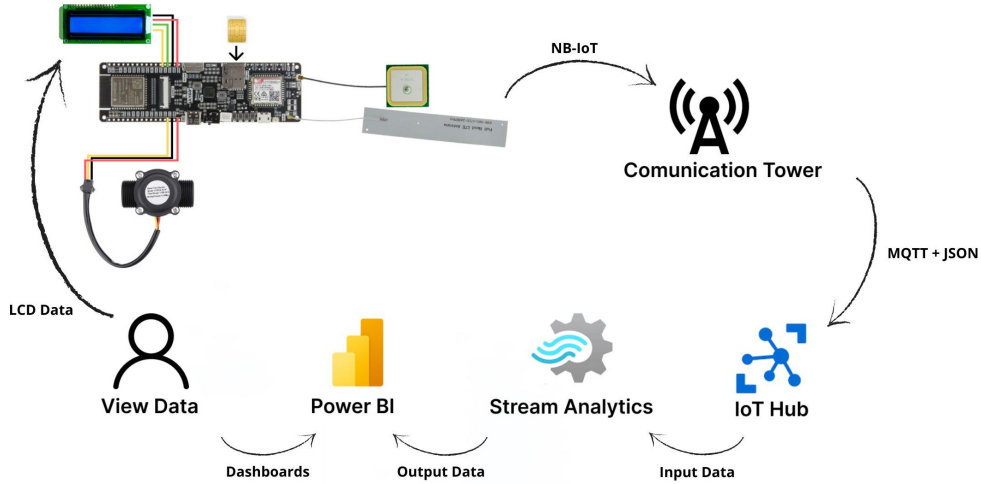


Fig. 1 Architecture of the designed prototype.

reliability. Among these technologies, LoRaWAN, Sigfox, and Narrowband IoT (NB-IoT) have been widely adopted due to their extended range and energy efficiency.

Martinez et al. [3] evaluated the performance boundaries of NB-IoT, highlighting its strong reliability advantages over LoRa in specific use cases, though noting variability in energy consumption and delay. In alignment with this, Pimenta and Chaves [4] proposed a retrofitted smart meter utilizing NB-IoT with energy harvesting, suitable for integration into legacy infrastructures.

García-Martín et al. [5] developed a combined low-power wireless system for smart water networks, integrating device-level intelligence with centralized monitoring to enhance energy and communication efficiency. Their approach leverages both IEEE 802.15.4g and NB-IoT standards, demonstrating a viable model for scalable urban deployments.

In a broader review, Okoli and Kabaso [6] emphasized the increasing role of NB-IoT in urban water automation, leakage detection, and loss prevention systems. Similarly, Al-Sammak et al. [7] presented a dual-stack architecture combining NB-IoT and LoRaWAN with adaptive algorithms, resulting in an 86% reduction in transmitted packets and substantial energy savings for smart meters.

Together, these studies form a comprehensive foundation that validates the use of NB-IoT and hybrid LPWAN models for remote water consumption monitoring. They inform the design and evaluation criteria used in the system described in this work.

3 System Architecture

The proposed system architecture is organized into three layers (as seen in figure 1): sensing, communication, and cloud analytics. Each component has been selected and

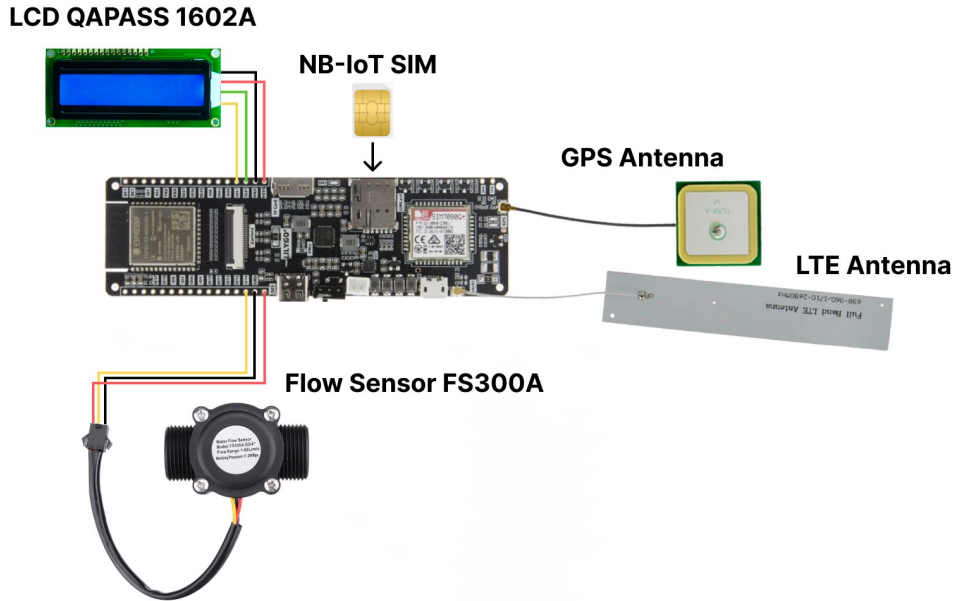


Fig. 2 Integration of hardware components with the microcontroller.

integrated with a focus on low power consumption, modularity, and compatibility with NB-IoT infrastructures [3, 4].

3.1 Sensing Layer

At the physical layer, the device is built around the LILYGO T-SIM7080G-S3 development board [8] (see figure 2), which combines an ESP32-S3 microcontroller with integrated NB-IoT and GNSS modules via the SIMCom SIM7080G modem [9]. Water flow measurement is performed using an FS300A hall-effect sensor [10], capable of accurately detecting flow rates between 1 and 60 liters per minute. The sensor generates a pulse signal, with 360 pulses corresponding to one liter of water, which is captured by the ESP32 using GPIO interrupts [6].

To ensure data persistence, the system utilizes onboard EEPROM to store the cumulative volume locally, which safeguards against power failures or temporary communication outages. An LCD 1602A module with an I2C interface provides real-time feedback to the user, displaying current flow rate, signal strength, GPS lock status, and total volume measured.

3.2 Communication Layer

The embedded firmware formats telemetry data into JSON messages that include the instantaneous flow rate, total accumulated volume, timestamp (retrieved via AT+CCLK?), GPS coordinates, and signal quality indicators. The device connects to

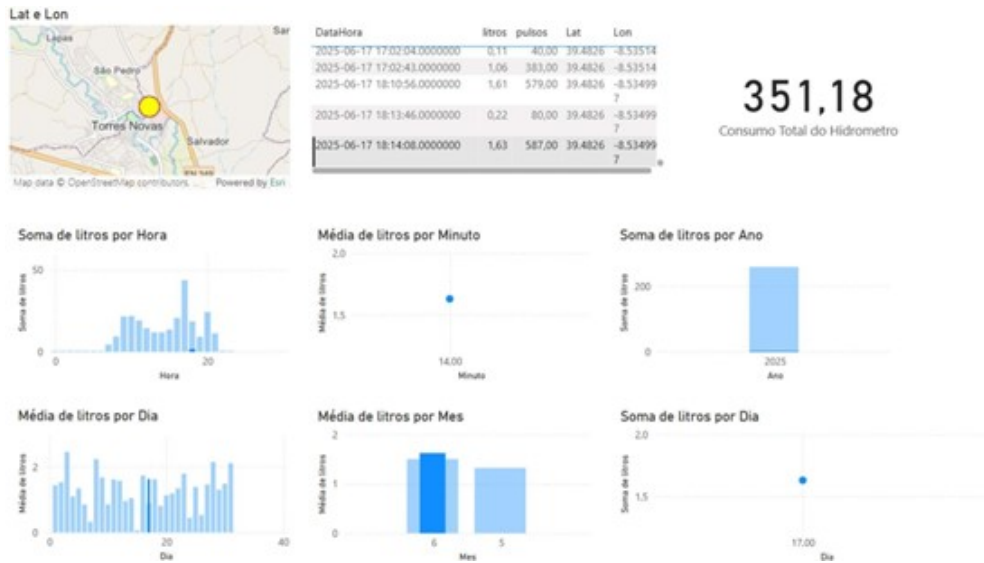


Fig. 3 Sample in PowerBI resulting from Azure Stream Analytics routing.

the NB-IoT network using a commercial MEO SIM card and transmits the messages securely to the Microsoft Azure cloud using the MQTT [11] protocol over TLS on port 8883 [5].

To reduce power consumption, the device follows a publish-and-disconnect communication model, where each transmission is followed by a graceful disconnection from the network. GPS is only activated during initial acquisition or at defined intervals to optimize energy usage, and fallback mechanisms are employed in case of prolonged fix delays.

3.3 Cloud and Visualization Layer

On the cloud side, Azure IoT Hub handles secure message ingestion. The incoming telemetry is routed to an Azure Stream Analytics job, where transformation rules are applied using SQL-like queries. The processed data is then forwarded to a Power BI Streaming Dataset for real-time visualization (figure 3).

The dashboards display water consumption trends and the geolocation of the meter. The system supports real-time monitoring of distributed nodes and is scalable for deployment in both urban and rural environments. It also lays the groundwork for the future integration of advanced analytics, including anomaly detection and consumption forecasting [7].

3.4 Software

The embedded firmware (communication and processing flowchart represented in figure 4), was developed in C++ using the Arduino framework for the ESP32-S3.

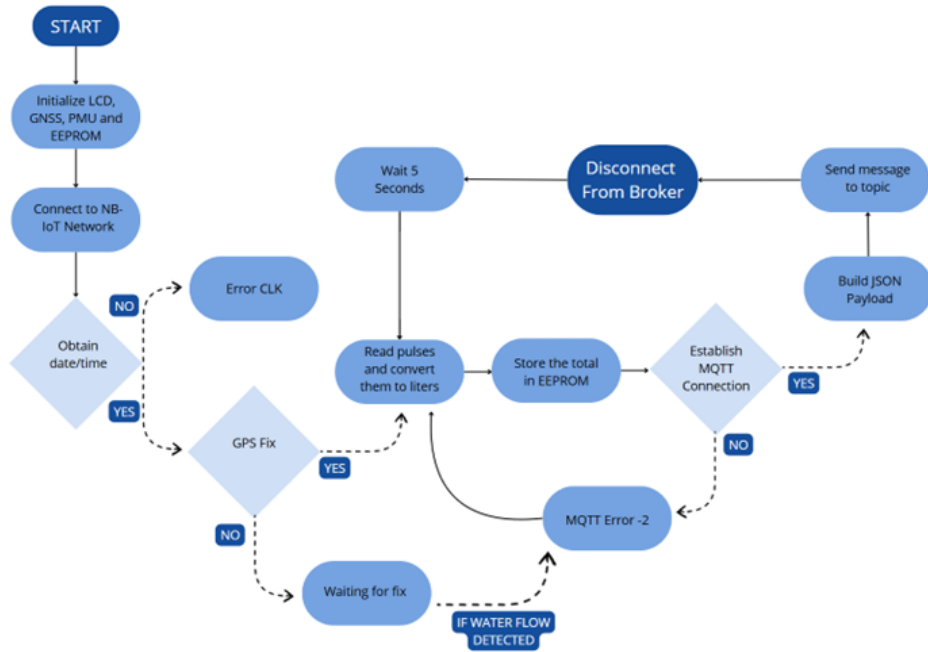


Fig. 4 Firmware communication and processing flowchart.

It is modular, asynchronous, and optimized for low-latency telemetry. Key modules include [12, 13]:

- **Pulse Acquisition:** Interrupt-driven sensor input using calibrated pulse-to-volume conversion.
- **Data Aggregation:** JSON message assembly with `ArduinoJson`.
- **Secure Communication:** NB-IoT connection via `TinyGSM` and `PubSubClient` with TLS encryption.
- **Data Persistence:** Volume totals stored to EEPROM during each publish cycle.
- **User Interface:** Real-time LCD output using `LiquidCrystal_I2C`.

Operational Cycle

The device follows a 5-second cycle:

1. Initialize hardware and restore data from EEPROM.
2. Count pulses continuously via GPIO interrupts.
3. Every 5 seconds:
 - Compute flow rate and update volume.
 - Query time and location.
 - Format JSON message.
 - Publish securely to Azure.
 - Disconnect and wait.

```

40 const char *mqttUsername = "HydrometerIoTHub.azure-devices.net/HydrometerDevice-001/?api-version:
41 const char *mqttPassword = "SharedAccessSignature sr=HydrometerIoTHub.azure-devices.net%2Fdevice:
42
43 TimeGetClientSecure_newClient(modem);

```

Output Serial Monitor X

Message (Enter to send message to 'ESP32-S3-Box' on 'COM4')

```

[MQTT] Conectado ao broker Azure!
AT+CASEND=0,225

>>CC-devices/HydrometerDevice-001/messages/events/{"litros":1.630556,"pulsos":587,"DataHora":"2025-06-
OK
[MQTT] Publicado com sucesso:
{"litros":1.630556,"pulsos":587,"DataHora":"2025-06-17T18:14:08Z","Ano":2025,"Mes":6,"Dia":17,"Hora":18
AT+CASEND=0,2

>>
OK
AT+CACLOSE=0

OK
[MQTT] Desconectado após envio.

```

Fig. 5 Serial interface successfully sending data to IoT Hub.

4. Display real-time status via LCD.

Power Optimization

Energy efficiency was a guiding principle. Optimizations include:

- Disconnected MQTT sessions to reduce radio usage.
- Conditional GPS activation (GPS is only activated once. When it gets the fix, it is turned off.).
- Planned deep sleep implementation for future revisions.

This architecture supports energy-constrained environments and ensures reliable cloud synchronization, even under intermittent connectivity.

4 Test and Validation

The test and validation phase assessed the system’s performance across four key dimensions: sensing accuracy, communication stability, data persistence, and cloud integration. Evaluations were carried out in both controlled laboratory settings and semi-realistic outdoor environments.

A test bench was developed using a 25-liter reservoir and a controlled outlet valve to simulate variable flow conditions. The FS300A hall-effect sensor output 360 pulses per liter, which were captured via GPIO interrupts on the ESP32-S3. Measured values for instantaneous flow and cumulative volume were consistent across trials, with deviations below 2% when compared to manual volume readings using a graduated container.

To assess communication, the device was tested in locations with varying NB-IoT signal strength using a MEO SIM card. JSON telemetry messages were transmitted

The screenshot displays the Azure Stream Analytics console. On the left, a navigation pane shows the hierarchy: Inputs (1) containing 'HydrometerIoTHub', Outputs (1) containing 'My-workspace', and Functions (0). The main area shows a 'Test query' window with the following SQL code:

```

1  /*
2  Here are links to help you get started with Stream Ana
3  Common query patterns - https://go.microsoft.com/fwlink
4  Query language - https://docs.microsoft.com/stream-ana
5  */
6  SELECT
7      litros,
8      pulsos,
9      DataHora,
10     Ano,
11     Mes,
12     Dia,
13     Hora,
14     Minuto,
15     Segundo,
16     Lat,
17     Lon,
18     Total
19 INTO
20     [My-workspace]
21 FROM
22     [HydrometerIoTHub]

```

Below the query editor, the 'Input preview' tab is active, showing sample events from 'HydrometerIoTHub'. The data is presented in a table format with columns for 'litros', 'pulsos', and 'DataHora'.

litros	pulsos	DataHora
<i>float</i>	<i>bigint</i>	<i>datetime</i>
1.608333	579	"2025-06-17T18:10:56Z"
0.222222	80	"2025-06-17T18:13:46Z"
1.630556	587	"2025-06-17T18:14:08Z"

Fig. 6 Azure Stream Analytics processing telemetry data from IoT Hub.

securely over MQTT/TLS to Azure IoT Hub (figure 5). Under strong coverage, transmission latency ranged from 2–5 seconds. When accounting for processing by Azure Stream Analytics (figure 6) and Power BI updates, end-to-end latency averaged under 15 seconds. Retry logic and local buffering ensured resilience against weak or unstable connectivity.

Power loss simulations were introduced during transmission cycles to evaluate persistence. Thanks to EEPROM storage, the device resumed operation and data consistency post-restart without issues—validating its suitability for remote deployments.

GNSS performance was tested outdoors and indoors. In open-sky conditions, GPS lock was acquired in 1-2 minutes. Indoors, fix times increased significantly or failed altogether. The firmware was adapted to decouple GNSS from telemetry, allowing uninterrupted data transmission when GPS is unavailable.

End-to-end validation confirmed that telemetry flowed correctly from device to Power BI dashboards via Azure components. Dashboards displayed real-time consumption, session uptime, and device geolocation. Multiple simultaneous sessions were supported, confirming system scalability. The prototype demonstrated a resilient, energy-efficient system for remote water metering. It achieved high sensing accuracy, low-latency communication, and robust data persistence. The modular design supports future extensions such as predictive analytics, leak detection, and integration into smart utility infrastructures.

5 Cost Analysis

A cost analysis was conducted to evaluate the economic feasibility of deploying the proposed smart water metering solution at scale. The analysis includes estimates of the total cost per unit—comprising hardware components, NB-IoT connectivity, and cloud services—and a comparative evaluation with commercially available smart metering systems.

5.1 Hardware Costs

The bill of materials (BoM) for a single smart meter node is summarized in Table 1. Prices reflect unit costs for low-volume procurement as of Q2 2025.

Table 1 Estimated Hardware Costs per Device

Component	Model	Cost (EUR)
Microcontroller with NB-IoT + GNSS	LILYGO T-SIM7080G-S3	37.00
Flow Sensor	FS300A	7.60
LCD Display (1602A I2C)	Generic	2.00
Antenna (NB-IoT + GPS)	External Dual-band	4.00
Enclosure (IP65-rated)	Custom ABS Box	5.00
Misc. Components (wires, PCB, connectors)	–	5.00
Total Hardware Cost	–	60.60

Bulk production and integration of components on a custom PCB could potentially reduce the total cost by 20–30%.

5.2 Connectivity Costs

NB-IoT connectivity was tested using a MEO IoT prepaid SIM card. Estimated costs for data plans suitable for low-bandwidth telemetry range from 1.00 to 1.50 euros per month per device. With an average transmission of 10–20 KB/day, even the most basic data plans are sufficient.

5.3 Cloud Infrastructure Costs

Microsoft Azure services were used for data ingestion, processing, and visualization. The following services were employed:

- **Azure IoT Hub:** Free tier supports 8,000 messages/day, sufficient for typical use.
- **Azure Stream Analytics:** Requires one streaming unit (0.10 euro/hour) for up to 10 devices.
- **Power BI:** Real-time dashboards via streaming datasets are available in the free tier. Power BI Pro may be required for multiple users.

Cloud costs for a 10-device pilot are estimated at 20–25 euros/month. For larger deployments, costs scale linearly and remain affordable due to low data volume.

5.4 Comparison with Commercial Systems

The developed prototype was compared with several commercially available smart water metering solutions.

Table 2 Comparison between the proposed prototype and current SMCB solutions

Context	Device	Cost (EUR)	Communication	Geolocation
Domestic Use	Axioma Qalcosonic W1 Proposed Prototype	71.00 70.00	LoRa (every 12h) NB-IoT (every 5s)	Manual Automatic via GPS
Commercial / Industrial	Itron Flostar M DN40	205.87	Impulse sensor + Datalogger	Manual
	Arad Octave DN40	580.00	Impulse sensor + Datalogger	Manual
	Proposed Prototype	70.00	Direct NB-IoT	Automatic via GPS
Measurement and Control Zones (MCZ)	Arad Octave DN100	1,386.00	Impulse sensor + Datalogger	Manual
	Proposed Prototype	70.00	Direct NB-IoT	Automatic via GPS

While commercial devices offer industrial-grade durability, certification, and long-term support, they come at a significantly higher cost. Table 2 summarizes the comparison.

The proposed solution offers a highly competitive alternative in terms of cost while preserving modularity, extensibility, and full control over data. This makes it particularly attractive for municipalities, academic research projects, or small-scale rural utilities seeking affordable smart metering without vendor lock-in.

Considering all factors—including hardware, connectivity, and cloud infrastructure—the total cost per unit over a 12-month period is estimated at approximately

70 euros. This positions the system as a viable low-cost alternative to proprietary smart metering solutions, supporting scalability, maintainability, and integration with broader smart city initiatives.

6 Conclusions and Future Work

This work presents the design, implementation, and validation of a low-cost, modular system for remote monitoring of water consumption using NB-IoT connectivity and cloud-based analytics. The proposed solution integrates a flow sensor, a microcontroller with embedded NB-IoT and GNSS capabilities, and Microsoft Azure services to deliver real-time telemetry, secure communication, and interactive visualization via Power BI dashboards.

The prototype demonstrated high reliability in pulse detection and flow calculation, with real-time data delivery to the cloud averaging end-to-end latencies below 15 seconds. The system supports persistent storage through EEPROM, automatic recovery from power failures, and seamless re-establishment of network connectivity. Its architecture was validated in both laboratory and outdoor test scenarios, showcasing its suitability for rural or infrastructure-limited regions.

From a financial perspective, the proposed solution is significantly more affordable than commercial smart metering systems, with an estimated cost of 70 euros per unit, including 12 months of connectivity and cloud usage. This positions it as a viable and scalable alternative for municipalities, utilities, or research-oriented pilot deployments aiming to reduce non-revenue water and improve resource efficiency.

Future Work

Several directions for future enhancement have been identified:

- **Energy autonomy:** Integration of solar power modules and battery management systems to enable long-term off-grid operation.
- **Anomaly detection:** Development of embedded or cloud-based machine learning models to detect leaks, unauthorized usage, or unusual consumption patterns.
- **Bidirectional communication:** Enabling remote firmware updates (FOTA) and device reconfiguration through MQTT downlink channels.
- **Mobile application:** Development of a user-facing mobile app to provide consumption alerts, billing estimates, and water-saving recommendations.
- **Field deployment at scale:** Collaboration with municipal water services to test large-scale deployment across multiple locations with varying topology and signal coverage.

The proposed system contributes to advancing smart metering technologies through its affordability, modularity, and use of open standards. By leveraging LPWAN communication and cloud intelligence, it lays the foundation for a new generation of intelligent water management solutions aligned with the principles of sustainability and digital transformation in urban and rural contexts.

References

- [1] United Nations Sustainable Development Goals: Goal 6: Clean Water and Sanitation. <https://sdgs.un.org/goals/goal6> Accessed 2024-12-25
- [2] Rodrigues, P.M.S., Isidoro, J.M.G.P.: 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 (2024)
- [3] Martinez, B., Adelantado, F., Bartoli, A., Vilajosana, X.: Exploring the performance boundaries of nb-iot. arXiv preprint [1810.00847](https://arxiv.org/abs/1810.00847)
- [4] Pimenta, N., Chaves, P.: Study and design of a retrofitted smart water meter solution with energy harvesting integration. *Discover Internet of Things* **1**(10) (2021) <https://doi.org/10.1007/s43926-021-00010-x>
- [5] García-Martín, J.P., Torralba, A., Hidalgo Fort, E., González-Carvajal, R.: Iot solution for smart water distribution networks based on a low-power wireless network, combined at the device-level: A case study. *Internet of Things* **22**, 100913 (2023) <https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100913>
- [6] Okoli, N.J., Kabaso, B.: Building a smart water city: Iot smart water technologies, applications, and future directions. *Water* **16**(4), 557 (2024) <https://doi.org/10.3390/w16040557>
- [7] Al-Sammak, K.A., Al-Gburi, S.H., Marghescu, I., Drăgulescu, A.-M.C., Marghescu, C., Martian, A., Al-Sammak, N.A.H., Suci, G., Alheeti, K.M.A.: Optimizing iot energy efficiency: Real-time adaptive algorithms for smart meters with lorawan and nb-iot. *Energies* **18**(4), 987 (2025) <https://doi.org/10.3390/en18040987>
- [8] T-SIM7080G S3. <https://lilygo.cc/products/t-sim7080-s3> Accessed 2025-05-21
- [9] SIM7080G. <https://www.simcom.com/product/SIM7080G.html> Accessed 2025-05-21
- [10] Water Flow Sensor (FS300A). <https://circuits-elec.com/products/water-flow-sensor-fs300a> Accessed 2025-05-23
- [11] MQTT: The Standard for IoT Messaging. <https://mqtt.org/> Accessed 2025-05-23
- [12] Liu, Q., Zhao, Y.: *Mastering Arduino: A Practical Guide to Building IoT Projects*. Packt Publishing, ??? (2020)
- [13] Singh, B., Kaur, S.: Secure iot communication using mqtt protocol with tls. *International Journal of Computer Applications* **178**(21), 1–6 (2019) <https://doi.org/10.5120/ijca2019918881>