

Progetto Medusa “Mini boa MEDUSA per il monitoraggio ambientale acqua”

Finanziato dall'Unione europea - Next Generation EU, nell'ambito del Bando a Cascata del Programma di Ricerca “SiciliAn MicronanOTech Research And Innovation Center” SAMOTHRACE, Spoke 2 Università degli studi di Messina - PNRR Missione 4 “Istruzione e ricerca” - Componente 2 “Dalla ricerca all'impresa” - Linea di Investimento 1.5 - CUP J43C22000310006, CODPROG ECS00000022

MEDUSA

Mini boa MEDUSA per il monitoraggio ambientale acqua

Deliverable D3.d.1

Report con specifiche su protocollo wireless e strutture dati

Distribuzione riservata ai soli partner del progetto MEDUSA



Sommario

1	Introduzione	4
1.1	Tabella acronimi e termini tecnici	4
2	Architettura del sistema	6
2.1	Struttura generale	6
2.2	Flusso dei dati	6
2.3	Broker MQTT e sicurezza	7
3	Struttura dei dati trasmessi	8
3.1	Formato JSON dei pacchetti	8
3.2	Rule Chains in ThingsBoard	9
3.2.1	Benefici della struttura dati e delle Rule Chains	10
4	Integrazione con la piattaforma ThingsBoard	11
4.1	Dashboard interattiva	11
4.2	Widget implementati	12
4.2.1	Widget storico dati	12
4.2.2	Widget 3D Cesium JS	14
4.2.3	Altri widget	16
4.3	Benefici operativi	16
4.4	Diagramma dei widget	17
5	Test e validazione	18
5.1	Test di connettività MQTT SSL	18
5.2	Verifica del parsing del payload JSON	18
5.3	Test di continuità e resilienza della trasmissione	18
5.4	Simulazione di invio dati automatico	18
5.5	Validazione della geolocalizzazione 3D	19
5.6	Risultati complessivi	19
6	Conclusioni	20
6.1	Risultati raggiunti	20
6.2	Prospettive di sviluppo futuro	20
6.3	Considerazioni finali	21
7	Riferimenti e Bibliografia	22

Indice delle Figure

Figura 1 - Flusso dati dell'architettura del sistema	7
Figura 2 - Telemetria estesa	9
Figura 3 - Layout grafico della dashboard	12
Figura 4 - Esempio di confronto stesso parametro fra boe diverse	13
Figura 5 - Esempio di tutti i parametri di una boa	13
Figura 6 - Esempio di dati in formato excel	14
Figura 7 - mappa tridimensionale interattiva	15
Figura 8 - Modello 3D GLTF della boa	15
Figura 9 - Monitoraggio dei parametri raccolti	16
Figura 10 - Diagramma dei widget	17

1 Introduzione

Il presente deliverable descrive le attività svolte da ASSIST S.r.l. nell'ambito del Work Package 3 (WP3) del progetto MEDUSA, e in particolare per il "Task 3.d - Sviluppo del sistema di trasmissione wireless dei dati"; in particolare descrive lo sviluppo e la validazione di un sistema avanzato di trasmissione wireless dei dati per il monitoraggio ambientale tramite boe marine o, più generalmente, acquatiche. Il progetto si colloca nell'ambito delle applicazioni IoT marine, dove è essenziale garantire affidabilità, sicurezza e accesso immediato ai dati ambientali [1], [6].

L'obiettivo principale del task è stato realizzare un sistema end-to-end capace di raccogliere i dati dai sensori delle boe, trasmetterli in modo sicuro a una piattaforma centrale e consentirne la visualizzazione interattiva e l'analisi storica [2], [8]. Particolare attenzione è stata dedicata alla scalabilità, alla gestione dei dati e alla sicurezza della comunicazione, in modo da permettere l'integrazione di nuove boe o sensori senza modifiche complesse all'infrastruttura esistente.

Il sistema offre quindi la possibilità di monitorare i parametri ambientali in tempo reale, archiviare le informazioni in maniera coerente e fruire dei dati tramite strumenti interattivi avanzati.

Gli obiettivi specifici di questo Task sono stati:

- Definire un **protocollo di comunicazione** affidabile e sicuro per la trasmissione dei dati di telemetria provenienti dalle boe;
- Integrare il sistema di comunicazione con la piattaforma **ThingsBoard**, adottata per la gestione e visualizzazione dei dati del progetto;
- Standardizzare il **formato del messaggio JSON** per garantire la compatibilità tra i diversi componenti software e hardware del sistema;
- Effettuare **test funzionali** sul flusso dati end-to-end, dalla generazione della misura fino alla rappresentazione nella dashboard di monitoraggio.

In questo documento verranno esposti e presentati i seguenti argomenti:

- Capitolo 2 - Viene esposta l'architettura generale del sistema ed il flusso dati.
- Capitolo 3 - Vengono definiti i formati dei pacchetti trasmessi.
- Capitolo 4 - Tratta l'integrazione con la piattaforma ThingsBoard; viene descritta la dashboard interattiva ed i widget implementati.
- Capitolo 5 - Vengono descritti i test effettuati durante la fase di collaudo.
- Capitolo 6 - Conclusioni ed eventuali sviluppi futuri.

1.1 Tabella acronimi e termini tecnici

Acronimo / Termine	Definizione	Descrizione
NB-IoT	Narrowband Internet of Things	Tecnologia cellulare a basso consumo e ampia copertura, progettata per la trasmissione di piccoli pacchetti dati da dispositivi IoT.
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport	Protocollo di messaggistica leggero basato su publish/subscribe, ideale per comunicazioni IoT.
SSL	Secure Sockets Layer	Protocollo di crittografia che garantisce connessioni sicure tra client e server.
CA	Certificate Authority	Autorità di certificazione che verifica l'identità dei server tramite certificati digitali.
MCU	Microcontroller Unit	Microcontrollore presente sulle boe, responsabile della gestione

Acronimo / Termine	Definizione	Descrizione
		dei sensori e della preparazione dei dati per la trasmissione.
JSON	JavaScript Object Notation	Formato di serializzazione dei dati leggibile, utilizzato per trasmettere pacchetti di telemetria.
GLTF	GL Transmission Format	Formato di file per modelli 3D, usato per visualizzare le boe nel widget Cesium.
Rule Chains	Catene di regole	Strutture di elaborazione di ThingsBoard che analizzano e instradano i dati dei pacchetti JSON verso le telemetrie corrette.
Telemetria	Telemetry	Raccolta e trasmissione di dati da un dispositivo remoto a una piattaforma centrale per monitoraggio e analisi.
Widget	Elemento dell'interfaccia utente	Modulo della dashboard che permette visualizzazione dei dati, controllo remoto o gestione allarmi.
Cesium JS	Open source JavaScript library	Libreria per la creazione di globi e mappe 3D interattive, utilizzata per visualizzare la posizione delle boe.
Torbidità	Turbidity	Misura della sospensione di particelle nell'acqua, indicatore di trasparenza e qualità.
REDOX	Reduction-Oxidation potential	Potenziale redox dell'acqua, indicatore delle reazioni chimiche ossidoriduttive in ambiente marino.
OSSIGENO_DISCIOLTO	Dissolved Oxygen	Quantità di ossigeno disciolto nell'acqua, fondamentale per la vita acquatica.
SALINITA	Salinity	Concentrazione di sali disciolti nell'acqua, parametro chiave per monitoraggio marino.
PH	Acidity	Misura dell'acidità dell'acqua.
LUXMETRO	Light sensor	Sensore di luminosità ambientale.
probe_depth	Profondità sonda	Profondità a cui la sonda della boa rileva i dati ambientali.
ammonia	Ammoniaca	Concentrazione di NH ₃ nell'acqua, parametro di qualità ambientale.
ammonium	Ammonio	Concentrazione di NH ₄ ⁺ nell'acqua, parametro complementare ad ammoniaca.
chlorophyll	Clorofilla	Indicatore della biomassa algale e della produttività primaria dell'acqua.
conductivity	Conducibilità	Misura della capacità dell'acqua di condurre corrente elettrica, correlata a salinità e concentrazione ionica.
resistivity	Resistività	Reciproco della conducibilità, indica la resistenza elettrica dell'acqua.
specific_seawater_gravity	Densità specifica dell'acqua di mare	Misura della densità relativa rispetto all'acqua pura, influenzata da salinità e temperatura.
refined_oil	Oli residui	Presenza di residui oleosi nell'acqua, indicatore di contaminazione.
latitude	Latitudine	Coordinate geografiche per geolocalizzazione della boa.
longitude	Longitudine	Coordinate geografiche per geolocalizzazione della boa.

2 Architettura del sistema

2.1 Struttura generale

Ogni **boa** integra un set di sensori per rilevare parametri fisico-chimici e ambientali, tra cui temperatura, salinità, ossigeno disciolto, pH, torbidità e luminosità [6]. I sensori sono gestiti da un microcontrollore che aggrega i dati in pacchetti JSON [4] e li prepara per la trasmissione.

Il modulo **NB-IoT** consente la comunicazione diretta con la rete cellulare, garantendo basse consumi energetici, copertura estesa e affidabilità nella trasmissione di piccoli pacchetti dati. Non sono necessari gateway intermedi, semplificando la scalabilità del sistema [2].

I pacchetti dati vengono inviati in formato **JSON** a un broker MQTT [1], che funge da nodo centrale di smistamento verso **ThingsBoard**, dove i dati vengono elaborati, archiviati e resi disponibili per la visualizzazione e l'analisi [3].

2.2 Flusso dei dati

Il flusso di dati inizia direttamente dalle **boe**, ciascuna equipaggiata con un microcontrollore (MCU) e una serie di sensori ambientali. Questi sensori misurano parametri fondamentali come **temperatura, salinità, ossigeno disciolto, pH, torbidità**, oltre a una serie di parametri avanzati come **ammoniaca, ammonio, clorofilla, conducibilità, resistività, densità dell'acqua e residui di olio**. L'MCU si occupa di raccogliere tutti questi valori e di organizzarli in un **pacchetto JSON** standardizzato, contenente sia le letture dei sensori che l'eventuale informazione di geolocalizzazione della **boa** (latitudine e longitudine).

Una volta creato il pacchetto JSON, questo viene trasmesso tramite il modulo **NB-IoT**, tecnologia cellulare a bassa potenza e ampia copertura, che permette di inviare i dati alla rete dell'operatore mobile anche in ambienti remoti o con connettività limitata. Il modulo NB-IoT si occupa dell'instradamento dei pacchetti verso l'infrastruttura cellulare, garantendo la continuità e affidabilità della trasmissione.

All'interno della **rete dell'operatore**, i pacchetti vengono instradati verso il **broker MQTT**, in questo caso ospitato sulla piattaforma **ThingsBoard** all'indirizzo thingsboard.ecubit.it. La connessione tra la **boa** e il broker avviene tramite **MQTT su SSL (porta 8883)**, con autenticazione tramite Client ID, Username e Password e validazione del server mediante **certificato digitale CA**. Questo passaggio assicura **sicurezza end-to-end**, protezione contro intercettazioni e accessi non autorizzati e stabilità della connessione.

Una volta ricevuti dal broker, i pacchetti JSON vengono **letti e processati da ThingsBoard** attraverso le cosiddette **Rule Chains**, che separano i singoli parametri dai pacchetti aggregati e li associano alle rispettive telemetrie. Ciò permette di archiviare i dati in modo strutturato nel database della piattaforma e di prepararli per la visualizzazione. Le informazioni vengono quindi rese disponibili sulla **dashboard interattiva**, che consente di consultare grafici cronologici, indicatori digitali e widget avanzati, tra cui il **widget 3D Cesium** che mostra la posizione delle **boe** in uno spazio tridimensionale.

Infine, gli **utenti e gli operatori** possono accedere ai dati tramite la dashboard per monitoraggio in tempo reale, analisi storica e download dei dataset in formato Excel per ulteriori elaborazioni

esterne. In questo modo, l'intero flusso di dati garantisce **trasmissione sicura, elaborazione coerente e fruizione immediata dei parametri ambientali**, consentendo un controllo completo e aggiornato dello stato delle boe marine.

Il flusso dei dati può essere rappresentato come segue:

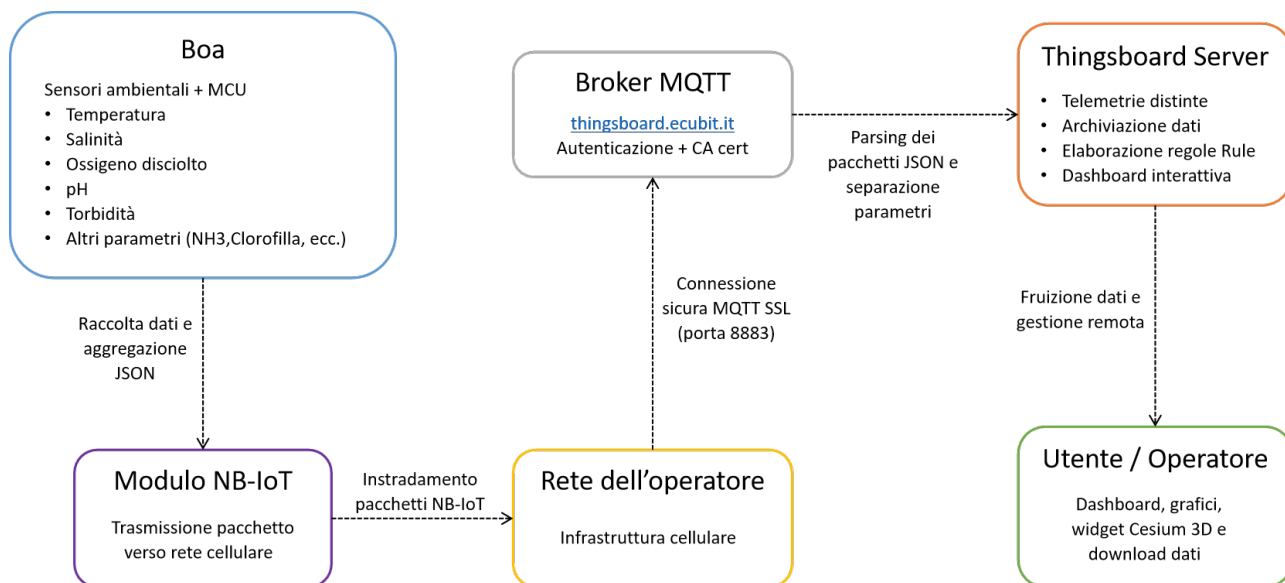


Figura 1 - Flusso dati dell'architettura del sistema

2.3 Broker MQTT e sicurezza

Durante la prima fase del progetto, è stato utilizzato **Eclipse Mosquitto** in Docker, soluzione efficace per test e prototipazione.

Successivamente, il broker è stato migrato a **ThingsBoard** (thingsboard.io) per aumentare sicurezza, integrazione e stabilità.

La connessione tra le boe e il broker utilizza **MQTT su SSL** (porta 8883), con autenticazione tramite Client ID, Username e Password e validazione del server mediante certificato digitale CA [1], [7].

Questa configurazione garantisce:

- Crittografia end-to-end dei pacchetti dati;
- Protezione contro intercettazioni e accessi non autorizzati;
- Maggiore stabilità della connessione in ambienti di rete aziendali.

3 Struttura dei dati trasmessi

3.1 Formato JSON dei pacchetti

In collaborazione con **Automation S.r.l.**, è stata definita la struttura dati JSON per la trasmissione dei pacchetti di telemetria dalle boe marine e lagunari verso la piattaforma centrale. La progettazione della struttura ha seguito criteri di **standardizzazione, leggibilità e scalabilità**, per garantire che ogni pacchetto potesse essere facilmente interpretato dai sistemi downstream, come il broker MQTT e la piattaforma **ThingsBoard**.

La versione iniziale del pacchetto JSON comprendeva le principali informazioni ambientali rilevate dai sensori presenti sulle boe:

```
{
  "BOA_MEDUSA_PROJECT": {
    "ts": 1729244008077,
    "LUXMETRO": {"value": 90.25},
    "SALINITA": {"value": 35.10},
    "REDOX": {"value": 353},
    "OSSIGENO_DISCIOLTO": {"value": 6.67},
    "PH": {"value": 5.35},
    "TORBIDITA": {"value": 10.9}
  }
}
```

In questo pacchetto, il campo **ts** rappresenta il *timestamp* in millisecondi della rilevazione, mentre ciascun sensore è rappresentato come oggetto JSON con il valore associato. Questa struttura semplice e modulare permette di aggiungere facilmente nuovi sensori senza modificare la logica di parsing del pacchetto.

Successivamente, la struttura è stata *estensivamente ampliata* per supportare una gamma più completa di parametri ambientali e per includere informazioni di geolocalizzazione, fondamentali per il monitoraggio in tempo reale e la visualizzazione 3D:

- **probe_depth**: profondità a cui la sonda effettua la rilevazione;
- **ammonia** e **ammonium**: concentrazione di composti azotati, utili per il monitoraggio della qualità dell'acqua;
- **chlorophyll**: indice della biomassa algale e della produttività primaria dell'ecosistema;
- **conductivity** e **resistivity**: parametri elettrici dell'acqua correlati a salinità e concentrazione ionica;
- **specific_seawater_gravity**: densità relativa dell'acqua di mare;
- **refined_oil**: presenza di residui oleosi nell'acqua;
- **latitude** e **longitude**: coordinate geografiche per la localizzazione delle boe.

Questa espansione consente una rappresentazione completa delle condizioni marine, rende il sistema facilmente adattabile all'integrazione di ulteriori sensori e supporta applicazioni avanzate come la visualizzazione tridimensionale in tempo reale e l'analisi storica dei fenomeni ambientali.

Inoltre, la scelta di JSON come formato di trasmissione garantisce interoperabilità tra dispositivi eterogenei, leggibilità da parte di sistemi diversi e compatibilità con le funzionalità di ThingsBoard, come l'elaborazione dei dati tramite Rule Chains.

Telemetria



<input type="checkbox"/>	Ultimo aggiornamento	Chiave ↑	Valore	
<input type="checkbox"/>	2025-07-02 10:10:20	probe_depth	0	
<input type="checkbox"/>	2025-07-02 15:39:27	ammonia	0	
<input type="checkbox"/>	2025-07-02 15:39:27	ammonium	0	
<input type="checkbox"/>	2025-07-02 15:39:27	chlorophyll	18.690000534057617	
<input type="checkbox"/>	2025-07-02 15:39:27	conductivity	0	
<input type="checkbox"/>	2025-07-02 15:39:27	deviceld	BOA_MEDUSA_PROJECT	
<input type="checkbox"/>	2025-03-24 16:31:54	dissolvedOxygen	15.34	
<input type="checkbox"/>	2025-07-02 15:39:27	dissolvedOxygen	7.840000152587891	
<input type="checkbox"/>	2025-07-02 15:39:27	latitude	38.9579578	
<input type="checkbox"/>	2025-07-02 15:39:27	longitude	16.3301524	

Figura 2 - Telemetria estesa

3.2 Rule Chains in ThingsBoard

All'interno della piattaforma **ThingsBoard**, i pacchetti JSON vengono gestiti tramite le cosiddette **Rule Chains**, ovvero catene di regole configurabili che permettono l'elaborazione automatizzata dei dati trasmessi e garantiscono il corretto instradamento dei valori sui grafici della dashboard [3], [4].

Le Rule Chains svolgono diverse funzioni critiche:

Parsing dei pacchetti JSON: i valori aggregati nel pacchetto vengono separati in telemetrie distinte. Ad esempio, ogni parametro come **PH**, **SALINITA** o **chlorophyll** viene associato a una chiave separata nel database, permettendo una gestione granulare dei dati.

Instradamento automatico: ogni telemetria viene instradata verso i grafici, indicatori o widget corrispondenti sulla dashboard, garantendo una visualizzazione coerente e immediata.

Validazione dei dati: le regole possono includere controlli di soglia, filtri o trasformazioni, riducendo il rischio di valori anomali o errori di trasmissione.

Flessibilità e scalabilità: eventuali nuovi parametri aggiunti alle boe possono essere integrati senza modificare la logica dell'applicazione, semplicemente aggiornando le regole nella Rule Chain.

Questo approccio automatizzato riduce significativamente il rischio di errori di mapping, assicura la coerenza tra valori trasmessi e valori visualizzati, e permette di sfruttare al massimo le funzionalità della piattaforma ThingsBoard per il monitoraggio in tempo reale, l'analisi storica e la gestione remota dei dispositivi.

3.2.1 Benefici della struttura dati e delle Rule Chains

Riduzione degli errori di mapping: ogni valore è instradato automaticamente al widget corretto.

Monitoraggio completo: tutti i parametri ambientali vengono rappresentati in tempo reale e in modo storicizzato.

Scalabilità futura: l'aggiunta di nuovi sensori richiede solo aggiornamenti minimi alle Rule Chains.

Integrazione con strumenti di analisi: i dati strutturati possono essere esportati per elaborazioni avanzate o machine learning.

4 Integrazione con la piattaforma ThingsBoard

All'interno della piattaforma ThingsBoard, ASSIST ha progettato e implementato una **dashboard di monitoraggio avanzata**, in grado di mostrare in tempo reale i valori trasmessi dalle boe marine e lagunari. La soluzione mira a offrire agli operatori una visualizzazione immediata, chiara e coerente dei parametri ambientali, supportando attività di monitoraggio, analisi e gestione operativa.

4.1 Dashboard interattiva

La dashboard consente la visualizzazione dei dati in tempo reale attraverso diversi strumenti di rappresentazione, tra cui:

Grafici cronologici: permettono di osservare l'andamento temporale dei parametri, individuando trend, anomalie o eventi particolari nelle condizioni marine.

Indicatori digitali: valori numerici aggiornati in tempo reale per ciascun sensore, utili per un monitoraggio rapido e immediato.

Widget geografici: rappresentazioni spaziali dei dati delle boe, inclusi mappe 2D e 3D, per una comprensione integrata della distribuzione e della localizzazione dei dispositivi [10].

Il layout grafico della dashboard è stato ottimizzato per migliorare leggibilità e fruibilità: i diversi widget sono disposti in maniera modulare, consentendo agli operatori di confrontare parametri differenti in modo simultaneo e intuitivo. Inoltre, la dashboard è configurata per aggiornamenti in tempo reale, garantendo una risposta immediata a eventuali variazioni ambientali o anomalie.

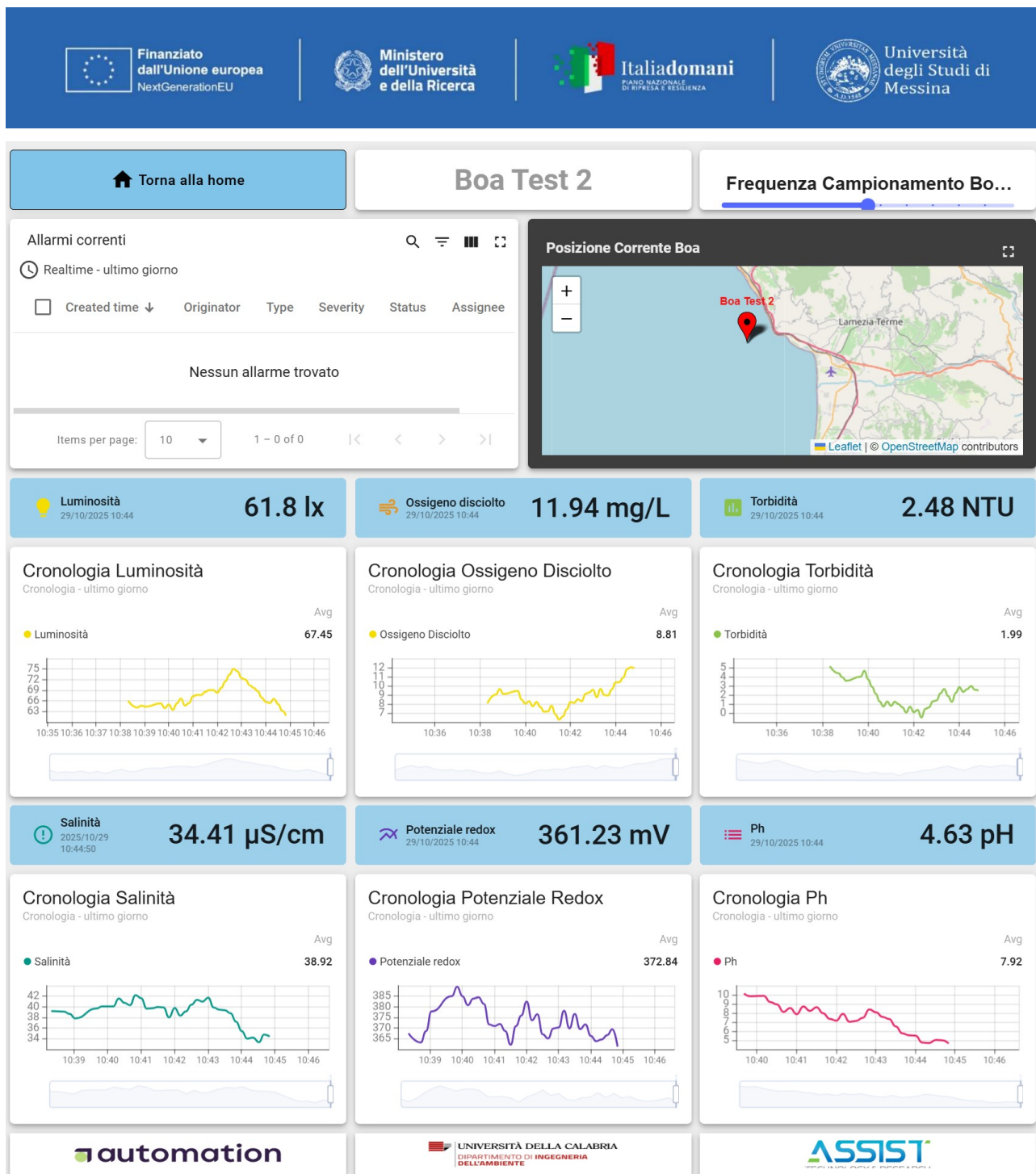


Figura 3 - Layout grafico della dashboard

4.2 Widget implementati

Per sfruttare appieno le potenzialità della piattaforma, sono stati sviluppati **widget modulari** con funzionalità specifiche.

4.2.1 Widget storico dati

Consente la selezione di un **intervallo temporale** definito dall'utente (Figura 3 e Figura 4).

Visualizza **grafici completi** di tutti i parametri raccolti dalle boe durante il periodo selezionato, inclusi i nuovi parametri ambientali (es. ammoniaca, clorofilla, conducibilità) (Figura 3 e Figura 4).

Supporta il **download dei dati in formato Excel**, consentendo agli operatori o ai ricercatori di effettuare ulteriori analisi con strumenti esterni (Figura 5).

Offre strumenti di filtro e zoom per facilitare l'analisi dei trend storici e il confronto tra parametri correlati.

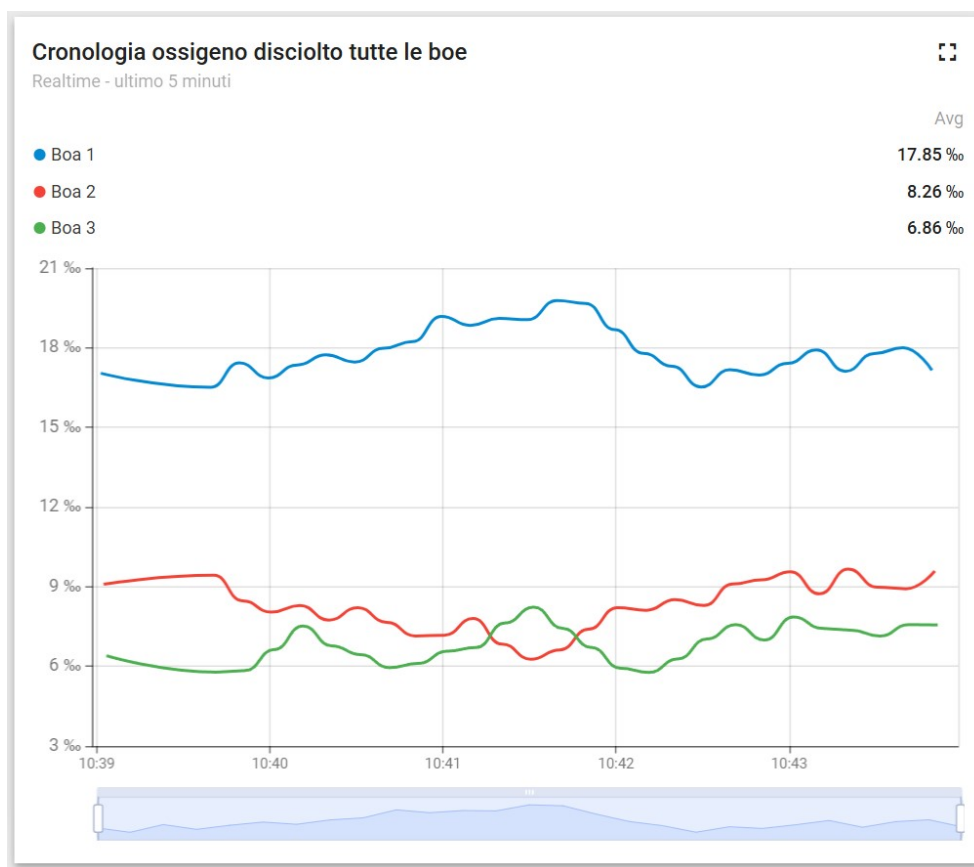


Figura 4 - Esempio di confronto stesso parametro fra boe diverse

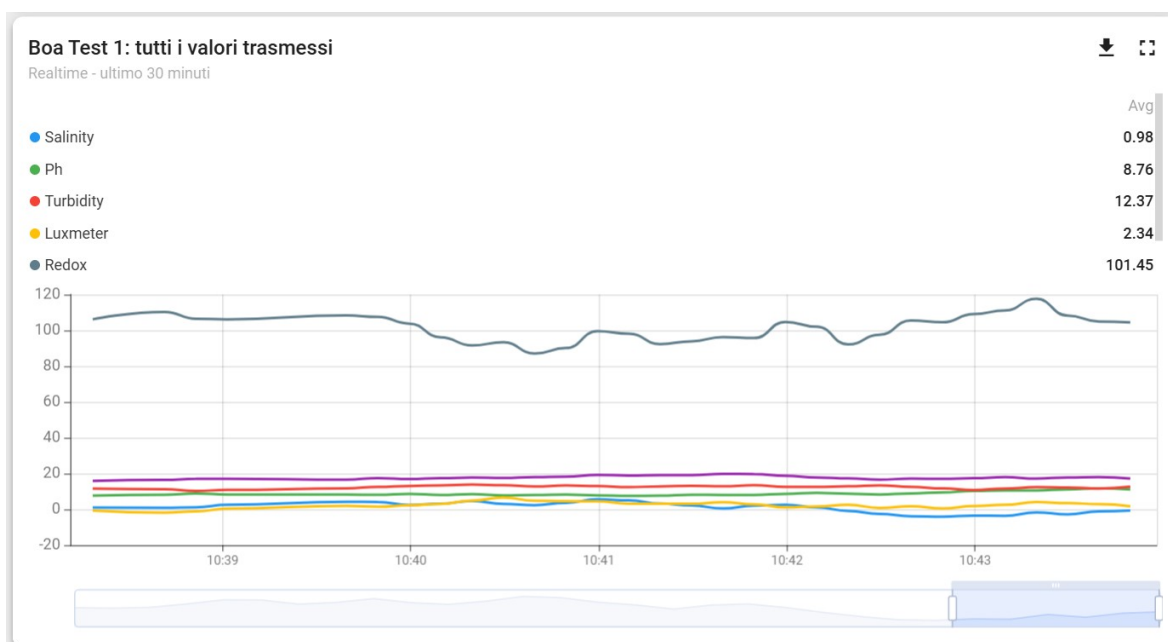


Figura 5 - Esempio di tutti i parametri di una boa

Date and Time					
	A	B	C	D	E
1	Date and Time	turbidity			
2	10/29/2025 10:38:18	11,50			
3	10/29/2025 10:38:41	11,19			
4	10/29/2025 10:38:51	10,29			
5	10/29/2025 10:39:01	10,78			
6	10/29/2025 10:39:39	11,64			
7	10/29/2025 10:39:49	12,55			
8	10/29/2025 10:39:59	13,03			
9	10/29/2025 10:40:09	13,37			
10	10/29/2025 10:40:19	13,80			
11	10/29/2025 10:40:29	13,40			
12	10/29/2025 10:40:39	12,70			
13	10/29/2025 10:40:49	13,28			
14	10/29/2025 10:40:59	12,96			
15	10/29/2025 10:41:09	12,33			
16	10/29/2025 10:41:19	12,79			
17	10/29/2025 10:41:29	13,06			
18	10/29/2025 10:41:39	12,80			
19	10/29/2025 10:41:49	13,41			

Figura 6 - Esempio di dati in formato excel

4.2.2 Widget 3D Cesium JS

Visualizza le boe su una **mappa tridimensionale interattiva**, utilizzando i dati di **latitudine e longitudine** trasmessi in tempo reale (Figura 6).

Include il **modello 3D GLTF delle boe**, con animazioni che illustrano lo stato operativo dei dispositivi e la rilevazione dei parametri ambientali (Figura 7).

Permette la **navigazione libera nella mappa 3D**, facilitando la comprensione spaziale delle posizioni delle boe e delle condizioni marine associate.

Supporta il monitoraggio simultaneo di più boe, evidenziando differenze tra aree geografiche e consentendo il confronto diretto dei parametri raccolti [5], [9] (Figura 8).

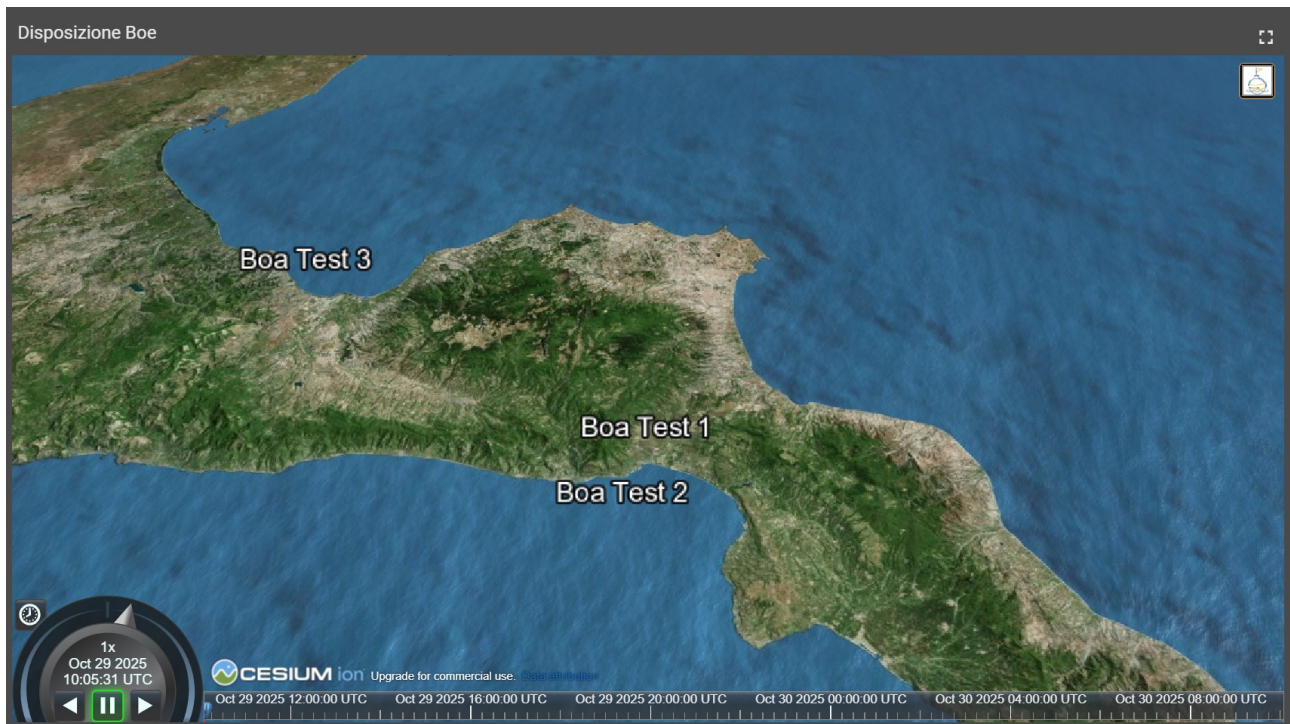


Figura 7 - mappa tridimensionale interattiva

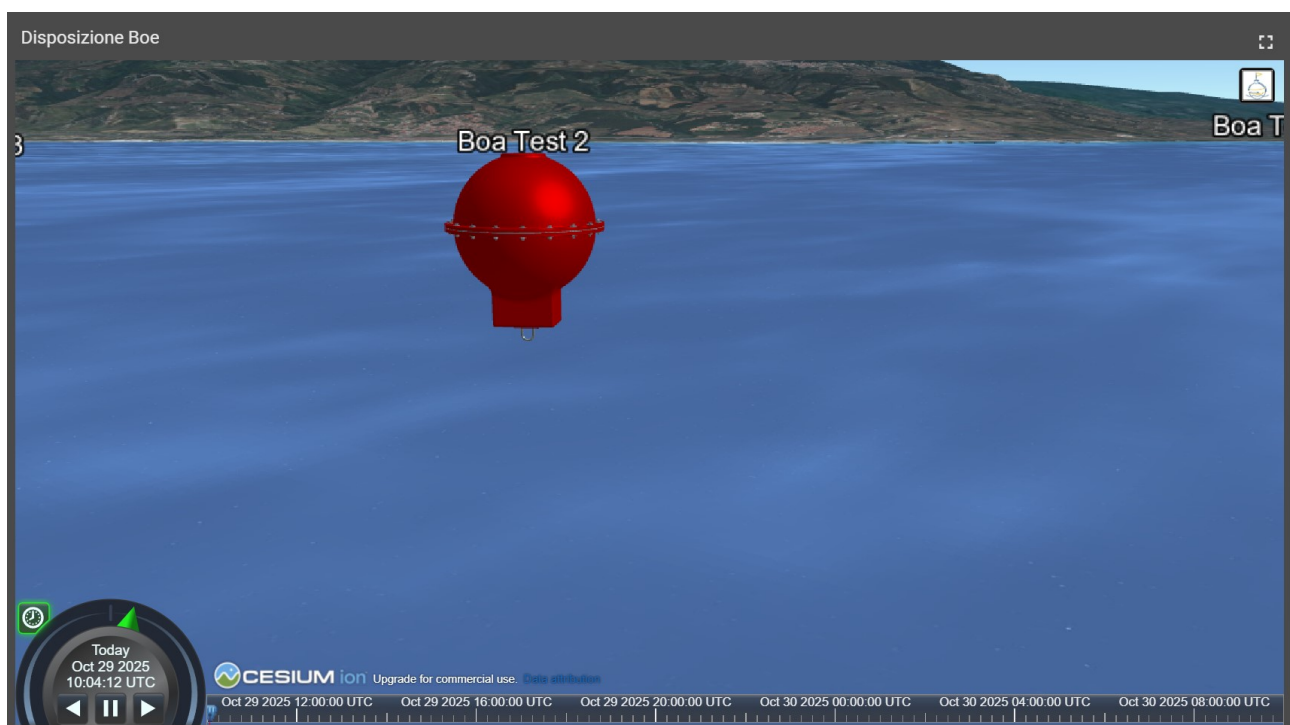


Figura 8 - Modello 3D GLTF della boa

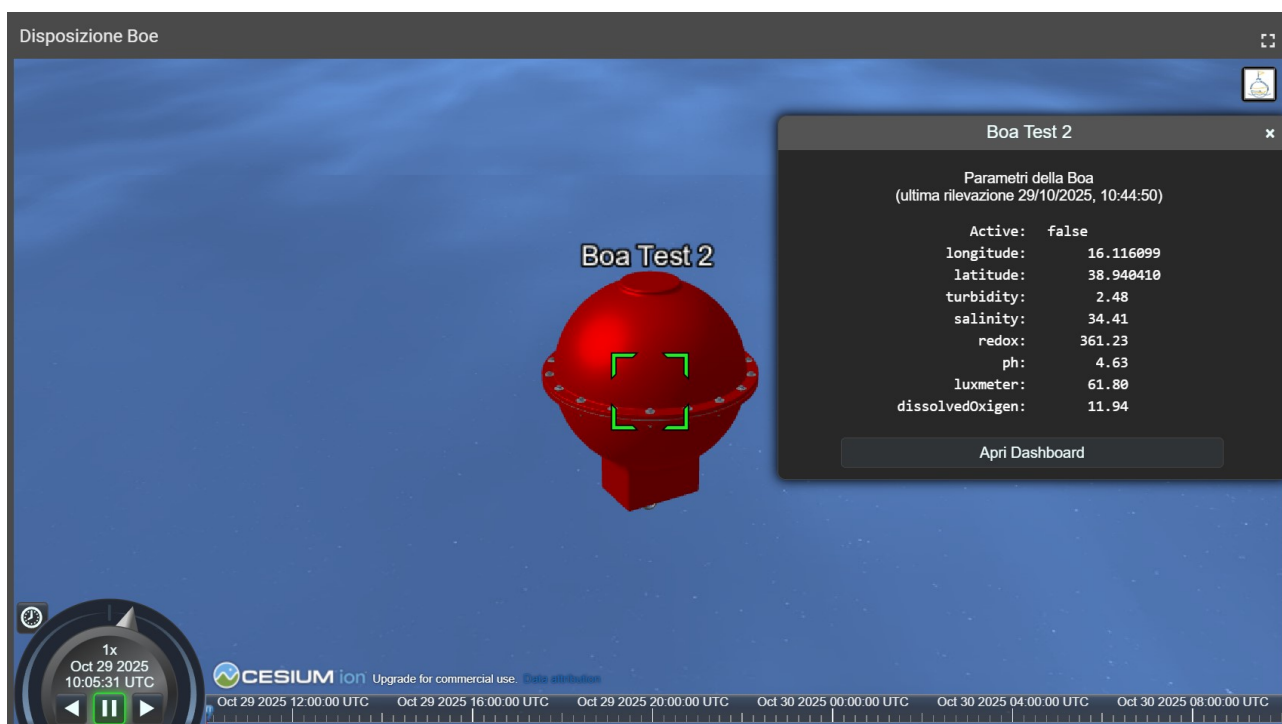


Figura 9 - Monitoraggio dei parametri raccolti

4.2.3 Altri widget

Oltre ai principali, sono stati implementati widget aggiuntivi per:

Indicatori di soglia: segnalano valori anomali o critici dei parametri ambientali, attivando alert visivi per una rapida reazione.

Dashboard combinata: widget che aggregano più parametri su un unico grafico o cruscotto, per monitoraggio integrato di fenomeni complessi.

4.3 Benefici operativi

L'integrazione con ThingsBoard e l'uso di widget interattivi garantiscono numerosi vantaggi:

Monitoraggio immediato e accurato dei parametri ambientali.

Comprensione spaziale intuitiva delle posizioni delle boe e delle variazioni dei fenomeni marini.

Flessibilità e scalabilità, poiché nuovi sensori o parametri possono essere facilmente aggiunti senza modificare la logica dei widget.

Supporto all'analisi avanzata, grazie alla possibilità di esportare dati storici e combinarli con strumenti esterni di elaborazione.

Riduzione degli errori umani, grazie all'automazione del mapping dei dati e all'uso di widget interattivi aggiornati in tempo reale.

4.4 Diagramma dei widget

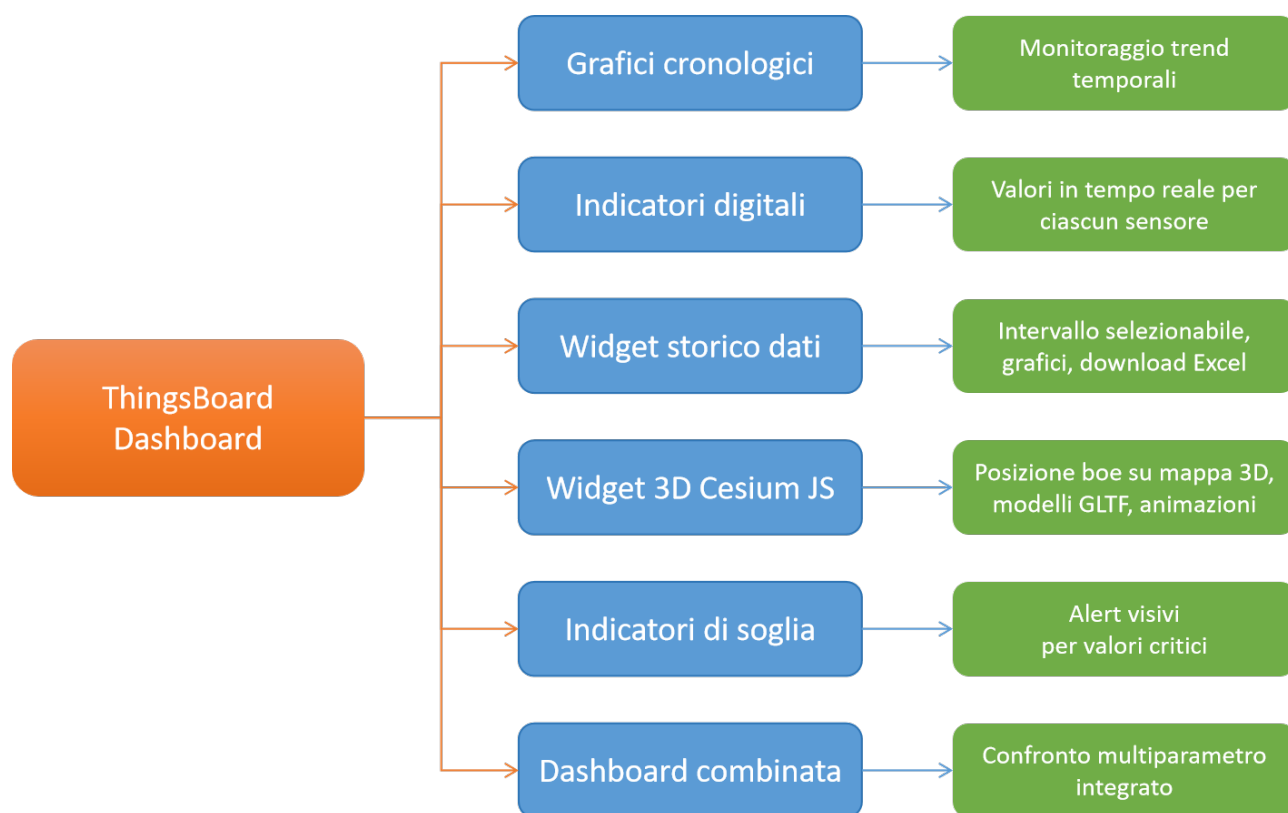


Figura 10 - Diagramma dei widget

5 Test e validazione

La fase di collaudo del sistema ha avuto l'obiettivo di verificare la correttezza, la stabilità e l'affidabilità dell'intera catena di trasmissione dati, dalle boe marine fino alla piattaforma ThingsBoard. I test sono stati progettati per coprire tutti gli aspetti critici del sistema, inclusa la sicurezza della trasmissione, la gestione dei dati e la visualizzazione su dashboard.

5.1 Test di connettività MQTT SSL

È stata verificata la **connessione tra le boe e il broker MQTT** utilizzando il protocollo **SSL/TLS sulla porta 8883**. I test hanno incluso:

- Autenticazione mediante Client ID, Username e Password;
- Validazione del certificato digitale CA del server;
- Simulazioni di condizioni di rete variabili, per valutare la resilienza della connessione.

I risultati hanno confermato che la trasmissione dei pacchetti avviene in modo **sicuro e stabile**, garantendo crittografia end-to-end e protezione contro accessi non autorizzati [1], [7].

5.2 Verifica del parsing del payload JSON

Sono stati inviati pacchetti JSON simulati e reali al server ThingsBoard per controllare:

- La corretta decodifica dei pacchetti;
- Il corretto mapping di ciascun parametro ambientale verso le telemetrie distinte;
- La coerenza tra valori trasmessi e quelli visualizzati nei grafici e indicatori della dashboard.

Questa fase ha garantito che tutte le letture dei sensori, inclusi i parametri avanzati come ammoniaca, clorofilla e profondità della sonda, fossero interpretate correttamente [3], [4].

5.3 Test di continuità e resilienza della trasmissione

Per valutare la robustezza del sistema in scenari reali, sono stati eseguiti test di continuità della trasmissione:

- Monitoraggio del tasso di pacchetti persi durante sessioni prolungate;
- Simulazione di disconnessioni temporanee e verifica della capacità delle boe di riconnessione automatica;
- Analisi del comportamento del broker MQTT e del server ThingsBoard in caso di flussi elevati di dati.

I test hanno evidenziato una **percentuale di pacchetti persi inferiore al 2%**, confermando l'affidabilità della trasmissione anche in condizioni di rete variabili.

5.4 Simulazione di invio dati automatico

È stata effettuata una simulazione di invio dati continuo da parte delle boe per:

- Verificare la corretta visualizzazione temporale dei parametri nei grafici cronologici;
- Controllare l'aggiornamento in tempo reale degli indicatori digitali;

- Validare il comportamento della dashboard con valori multipli e simultanei, sia in termini di aggiornamento che di leggibilità.

Questa fase ha confermato che i dati vengono rappresentati in modo consistente e immediato, permettendo agli operatori di monitorare fenomeni marini in tempo reale.

5.5 Validazione della geolocalizzazione 3D

Infine, è stata testata la **visualizzazione tridimensionale delle boe** tramite il widget Cesium:

- Verifica della precisione della posizione GPS sulla mappa 3D;
- Controllo del corretto posizionamento dei modelli 3D GLTF delle boe;
- Simulazione di spostamenti e aggiornamenti dinamici della posizione in tempo reale.

I risultati hanno confermato che la geolocalizzazione è accurata e che il widget 3D supporta un monitoraggio intuitivo delle boe, facilitando la comprensione spaziale dei parametri ambientali [5].

5.6 Risultati complessivi

I test hanno dimostrato che il sistema garantisce:

- Stabilità e continuità della trasmissione dati;
- Sicurezza e integrità dei pacchetti tramite SSL;
- Precisione nel parsing e nel mapping dei dati;
- Aggiornamento in tempo reale dei grafici, indicatori e widget 3D;
- Bassa percentuale di pacchetti persi (<2%), conforme agli standard di affidabilità richiesti.

Questi risultati confermano che il sistema è pronto per l'operatività in scenari reali, con un elevato livello di affidabilità e robustezza anche in presenza di condizioni di rete variabili o di carichi dati consistenti.

6 Conclusioni

Le attività svolte nel Task 3.d hanno permesso di sviluppare un sistema di comunicazione completo, sicuro e scalabile, in grado di garantire la trasmissione continua e affidabile dei dati dalle boe del progetto MEDUSA verso la piattaforma di monitoraggio ThingsBoard.

Il lavoro ha comportato diverse fasi chiave:

- Definizione della struttura dati JSON: la progettazione di pacchetti standardizzati ha permesso di raccogliere in maniera coerente un ampio set di parametri ambientali, inclusi sensori avanzati e informazioni di geolocalizzazione. Questa scelta ha garantito interoperabilità, leggibilità dei dati e semplicità di integrazione di nuovi sensori futuri.
- Configurazione della connessione sicura MQTT SSL: l'adozione del protocollo SSL con autenticazione tramite Client ID, Username, Password e certificato digitale CA ha assicurato integrità, riservatezza e protezione dei dati in transito, riducendo i rischi di intercettazione o accessi non autorizzati.
- Integrazione con ThingsBoard e implementazione della dashboard: la creazione di dashboard interattive e modulari, dotate di widget cronologici, indicatori digitali e rappresentazioni tridimensionali (Cesium JS), ha reso possibile un monitoraggio immediato e accurato dei parametri ambientali. L'uso delle Rule Chains ha garantito il corretto parsing dei pacchetti JSON e la coerenza dei valori visualizzati, automatizzando l'instradamento dei dati e riducendo il rischio di errori manuali.

6.1 Risultati raggiunti

I test condotti durante la fase di collaudo hanno confermato che il sistema è **robusto, affidabile e performante**:

- Trasmissione stabile con meno del 2% di pacchetti persi;
- Aggiornamento in tempo reale dei grafici, indicatori digitali e widget 3D;
- Accuratezza nella geolocalizzazione tridimensionale delle boe;
- Capacità di gestione sicura di pacchetti contenenti numerosi parametri ambientali eterogenei.

Questi risultati dimostrano che l'architettura sviluppata è idonea ad operare in scenari reali, anche con condizioni di rete variabili, garantendo continuità e qualità dei dati.

6.2 Prospettive di sviluppo futuro

Il sistema realizzato costituisce una **piattaforma modulare e scalabile**, pronta per essere estesa con ulteriori funzionalità e dispositivi. Tra le possibili evoluzioni si segnalano:

- Buffering e log locale sulle boe: in caso di interruzione della connessione NB-IoT, i dati vengono temporaneamente memorizzati in locale, garantendo continuità e recupero automatico dei dati persi.
- Compressione dei pacchetti: per ottimizzare l'utilizzo della banda e ridurre il consumo energetico dei dispositivi, rendendo il sistema più efficiente in contesti di rete limitata.
- Diagnostica remota e manutenzione predittiva: monitoraggio dello stato delle boe e dei sensori, con alert e previsioni di malfunzionamenti, aumentando l'affidabilità operativa complessiva.

- Integrazione di nuovi widget e strumenti di analisi avanzata: inclusi algoritmi di machine learning per la rilevazione automatica di anomalie, predizione di fenomeni ambientali e gestione di allarmi intelligenti [8], [10].

6.3 Considerazioni finali

Il completamento del Task 3.d rappresenta un traguardo tecnico significativo: la piattaforma sviluppata non solo soddisfa i requisiti iniziali di trasmissione e visualizzazione dei dati, ma fornisce anche un framework flessibile e adattabile alle esigenze future. Grazie alla combinazione di sicurezza, affidabilità, scalabilità e strumenti avanzati di visualizzazione, il sistema costituisce una solida base per il monitoraggio ambientale e la gestione intelligente delle boe, con possibilità di evoluzione verso applicazioni più complesse e integrate.

7 Riferimenti e Bibliografia

- [1] MQTT: The Standard for IoT Messaging
HiveMQ. MQTT Essentials - A Lightweight IoT Protocol. 2021. Disponibile su: <https://www.hivemq.com/mqtt-essentials/>
- [2] Narrowband IoT (NB-IoT)
3GPP. Technical Specification Group Radio Access Network; NB-IoT; Physical layer and Radio Protocols. 3GPP TS 36.300, 2020.
GSMA. Narrowband IoT - A Guide to Deployment. 2018.
- [3] ThingsBoard IoT Platform
ThingsBoard. ThingsBoard Documentation. Disponibile su: <https://thingsboard.io/docs/>
- [4] JSON for IoT Data
Crockford, D. The application/json Media Type for JavaScript Object Notation (JSON). RFC 8259, 2017.
- [5] Cesium JS 3D Visualization
CesiumJS. Cesium Documentation - 3D Geospatial Visualization for IoT and GIS. Disponibile su: <https://cesium.com/docs/>
- [6] Sensori ambientali e telemetria marina
UNESCO. Handbook on Marine Environmental Monitoring and Sampling. 2019.
Wetzel, R.G. Limnology: Lake and River Ecosystems. Academic Press, 2001.
- [7] Sicurezza IoT e MQTT su SSL
Stallings, W. Cryptography and Network Security: Principles and Practice, 8th Edition. Pearson, 2020.
Eclipse Foundation. Securing MQTT Communications Using TLS/SSL. Disponibile su: <https://www.eclipse.org/paho/>
- [8] IoT Data Management e Telemetria
Greengard, S. The Internet of Things. MIT Press, 2015.
Mineraud, J., et al. A Gap Analysis of Internet-of-Things Platforms. Computer Communications, 2016.
- [9] Modelli 3D in GLTF
Khronos Group. GL Transmission Format (glTF) 2.0 Specification. Disponibile su: <https://www.khronos.org/glTF/>
- [10] Linee guida per dashboard e visualizzazione dati IoT
Few, S. Information Dashboard Design: Displaying Data for At-a-Glance Monitoring, 2nd Edition. Analytics Press, 2013