

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 D4.b.1

Report con test funzionali e di validazione

Distribuzione riservata ai soli partner del progetto MEDUSA



Sommario

1	Introduzione	4
1.1	Tabella acronimi e termini tecnici	4
2	Obiettivi dei test	6
3	Setup di test	7
3.1	Laboratorio e strumentazione	7
3.2	Architettura del sistema in test	7
3.2.1	Diagramma di riferimento	7
4	Calibrazione dei sensori	9
4.1	Obiettivo della calibrazione	9
4.2	Procedura generica di calibrazione	9
4.3	Specifiche applicate alla mini-boia	10
4.4	Risultati ottenuti	10
4.5	Prospettive future	11
5	Test funzionali	12
5.1	Verifica dei sensori	12
5.2	Test di acquisizione e trasmissione	12
5.3	Test energetici	12
6	Test di validazione e risultati	13
7	Conclusioni	14
8	Riferimenti e Bibliografia	15



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Università
degli Studi di
Messina

Indice delle Figure

Figura 1 - Diagramma di riferimento	8
---	---

1 Introduzione

Il presente documento descrive le attività di test funzionali e di validazione condotte sulla mini-ba prototipale sviluppata nell'ambito del progetto MEDUSA.

L'obiettivo principale di questa fase è verificare la correttezza del funzionamento, la rispondenza ai requisiti di progetto e la stabilità operativa del sistema integrato, composto da sensori ambientali, unità di acquisizione dati, sistema di trasmissione wireless e modulo di alimentazione autonoma [10], [11].

La mini-ba rappresenta la versione compatta del sistema di monitoraggio, integrando i sensori selezionati e sviluppati nel WP2 e seguendo le specifiche definite nel WP1 [12].

Le attività di test si sono concentrate sia sugli aspetti elettronici e di misura (tensione, corrente, potenza, consumi) sia sulla qualità del segnale dei sensori e sulla coerenza dei dati acquisiti [9], [15].

1.1 Tabella acronimi e termini tecnici

Sigla / Termine	Descrizione
MCU (Microcontroller Unit)	Unità di microcontrollo principale che gestisce l'acquisizione dei dati dai sensori e la loro trasmissione.
NB-IoT (Narrowband Internet of Things)	Tecnologia di comunicazione cellulare a basso consumo e ampia copertura, usata per dispositivi IoT che trasmettono piccole quantità di dati.
MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)	Protocollo di comunicazione leggero, basato su pubblicazione/sottoscrizione, usato per trasmettere dati tra dispositivi IoT e server.
SSL (Secure Sockets Layer)	Protocollo crittografico che garantisce la sicurezza nella trasmissione dati tra client e server.
JSON (JavaScript Object Notation)	Formato di scambio dati leggibile e compatto, utilizzato per la trasmissione delle misure dai sensori alla piattaforma ThingsBoard.
ThingsBoard	Piattaforma open-source per la gestione di dispositivi IoT, l'acquisizione dati e la visualizzazione tramite dashboard.
WP (Work Package)	Unità di lavoro o fase del progetto, come definita nel piano di progetto (es. WP1: specifiche, WP2: sviluppo sensori, WP3: integrazione).
Offset	Differenza tra il valore reale e quello misurato da un sensore in condizioni di riferimento (errore sistematico costante).
Gain Error	Scostamento nella sensibilità del sensore rispetto al valore ideale (errore di pendenza).
Drift (Deriva)	Variazione lenta del valore misurato da un sensore nel tempo, anche a condizioni costanti.
Linearità	Capacità del sensore di mantenere una risposta proporzionale rispetto alla grandezza fisica misurata lungo tutto l'intervallo operativo.
Cross-sensitività	Influenza che una grandezza non desiderata (es. temperatura, pressione) può avere sulla misura principale del sensore.
Calibrazione a zero / span	Procedura per definire i punti di riferimento minimo (zero) e massimo (span) della risposta del sensore.
Tracciabilità metrologica	Capacità di collegare una misura a uno standard nazionale o internazionale attraverso una catena di calibrazioni documentate.

ISO 17025	Norma internazionale che specifica i requisiti generali per la competenza dei laboratori di prova e taratura.
Source Meter	Strumento di laboratorio in grado di fornire tensione o corrente controllata e misurare simultaneamente i parametri elettrici.
Analizzatore di potenza	Strumento che misura potenza attiva, reattiva e fattore di potenza, utile per valutare l'efficienza energetica del sistema.
MQTT Broker	Server che gestisce la distribuzione dei messaggi tra dispositivi (publisher) e client (subscriber).
Handshake SSL	Procedura iniziale di autenticazione e negoziazione tra client e server per stabilire una connessione sicura.
Firmware	Software a basso livello residente sulla MCU, che gestisce le operazioni hardware e le logiche di acquisizione e comunicazione.
Dataset "as-found" / "as-left"	Serie di misure registrate prima ("as-found") e dopo ("as-left") la calibrazione, usate per documentare l'efficacia dell'intervento.
Bath termico	Sistema di riferimento per calibrazione a temperatura controllata, usato per sensori termici.
Soluzione standard	Liquido con concentrazione nota di un composto (es. NaCl, tampone pH) utilizzato come riferimento per calibrazione.
Deriva termica	Variazione del segnale di un sensore in funzione della temperatura, anche in assenza di variazione del parametro misurato.
Vasca di calibrazione	Struttura di prova per simulare condizioni ambientali marine controllate durante i test dei sensori.
Autonomia energetica	Tempo operativo della mini-boia prima della necessità di ricaricare o sostituire la batteria.
Machine Learning	Approccio computazionale per analizzare e prevedere andamenti dei dati (es. deriva dei sensori) in modo automatico.
Ricalibrazione in-situ	Procedura di calibrazione effettuata direttamente sul campo, senza smontare il sensore.
Packet Loss	Percentuale di pacchetti dati persi durante la trasmissione NB-IoT verso il server.
Latenza	Tempo di ritardo tra l'invio e la ricezione di un pacchetto dati nella rete di comunicazione.

2 Obiettivi dei test

Gli obiettivi specifici della campagna di test sono stati i seguenti:

Verificare la corretta acquisizione dei dati da parte di ciascun sensore integrato nella mini-bao.

Valutare la coerenza dei valori misurati rispetto ai parametri di riferimento e alle specifiche definite nel WP1.

Caratterizzare i consumi elettrici delle diverse sezioni elettroniche del sistema (MCU, sensori, trasmettitore NB-IoT, moduli ausiliari).

Confermare l'affidabilità della trasmissione dati tra la mini-bao e la piattaforma ThingsBoard tramite il protocollo MQTT su SSL.

Verificare la stabilità operativa del sistema durante sessioni di acquisizione prolungate, simulando condizioni d'uso reali.

3 Setup di test

3.1 Laboratorio e strumentazione

I test sono stati eseguiti presso il laboratorio di misura e integrazione elettronica di ASSIST, con strumenti certificati e tarati in accordo alla norma ISO/IEC 17025:2017 [1].

Per la caratterizzazione dei parametri elettrici e funzionali sono stati impiegati:

Strumento	Modello / Tipo	Funzione principale
Source Meter	Keithley 2400	Misura di corrente, tensione e potenza con alimentazione controllata
Multimetro digitale	Fluke 87V	Misure puntuali di tensione e corrente sui sensori
Oscilloscopio	Tektronix TBS1102	Analisi delle forme d'onda e temporizzazione dei segnali digitali
Analizzatore di potenza	Yokogawa WT310	Monitoraggio del consumo totale del sistema
PC di controllo	Linux/Windows	Acquisizione dati e monitoraggio via seriale e MQTT
Camera climatica (se utilizzata)	-	Test di temperatura controllata per verifica sensori ambientali

3.2 Architettura del sistema in test

La struttura hardware e la configurazione di misura seguono le buone pratiche per sistemi di acquisizione IoT ambientali documentate da Campbell Scientific [9].

Il sistema oggetto di validazione è costituito da:

Microcontrollore (MCU): gestisce l'acquisizione dei dati e la loro formattazione JSON.

Sensori ambientali: temperatura, salinità, ossigeno disciolto, pH, torbidità, redox, clorofilla, ammoniaca, conducibilità, ecc.

Modulo di comunicazione NB-IoT: trasmette i pacchetti al broker MQTT in ThingsBoard.

Alimentazione: batteria al litio con regolatore DC-DC e modulo di ricarica.

3.2.1 Diagramma di riferimento

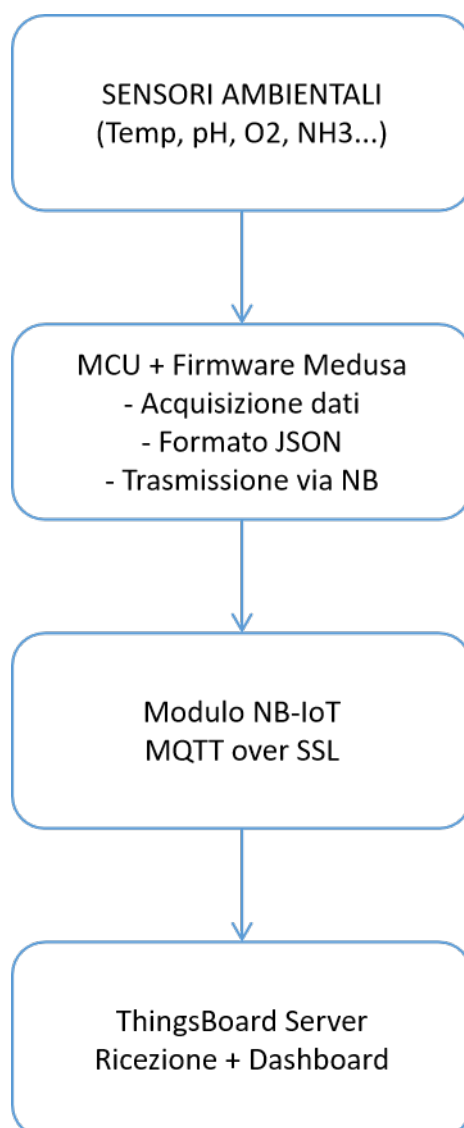


Figura 1 - Diagramma di riferimento

4 Calibrazione dei sensori

4.1 Obiettivo della calibrazione

La calibrazione dei sensori ha lo scopo di garantire che ciascun sensore integrato nella mini-boa fornisca misure accurate, ripetibili e tracciabili rispetto a standard di riferimento e in accordo con i principi definiti da ISO/IEC 17025 e NIST TN 1297 [1], [15]. In questo contesto, la procedura mira a:

- identificare e correggere eventuali **offset** (spostamenti rispetto al valore ideale) e **gain errors** (scarti nella sensibilità);
- valutare la **linearità** della risposta del sensore su tutto l'intervallo operativo;
- definire la **frequenza di calibrazione** e la modalità di mantenimento del dato affidabile, in accordo con le condizioni operative marine/lagunari.

4.2 Procedura generica di calibrazione

La procedura segue un approccio modulare, applicabile a ciascun tipo di sensore (temperatura, salinità, ossigeno disciolto, pH, torbidità, ecc.).

Le metodologie di calibrazione applicate derivano da standard internazionali e manuali tecnici di riferimento:

- ISO 5814 per sensori di ossigeno disciolto [3];
- ASTM D1293-18 per pH [4];
- ISO 7027-1 per torbidità [5];
- ISO 6059 per salinità e conducibilità [2];
- Linee guida Aanderaa e YSI per sensori multiparametrici [7], [8].

Ecco i passaggi tipici:

Preparazione del sensore e ambiente di test

Assicurare che il sensore sia in condizioni stabili e in equilibrio termico o chimico prima della misurazione. Per sensori immersione / acqua, pre-condizionare in soluzione o acqua di mare simulata. □

Annotare identificativo sensore, data calibrazione, condizioni ambiente (temperatura, pressione, salinità) e strumenti di riferimento utilizzati. □

Zero calibration (punto di misura a zero o minimo)

Ad esempio per un sensore di ossigeno, preparare una soluzione a 0 % saturazione; per pH o salinità usare soluzioni standard. □

Misurare l'uscita del sensore e calcolare lo scostamento rispetto al valore di riferimento.

Span calibration (punto di misura a pieno range)

Applicare al sensore un valore di riferimento noto al massimo dell'intervallo operativo (es. pH 9, salinità standard, ecc.). Misurare l'uscita e calcolare la deviazione. □

Calcolare i coefficienti di correzione per sensibilità e linearità.

Verifica della linearità e cross-sensitività

Eseguire misure su più punti (es. 3-5) lungo l'intervallo operativo, verificando la risposta del sensore e correggendo eventuali comportamenti non lineari. □

Per sensori marini particolarmente sensibili a temperatura e pressione (es. sensore di profondità o conducibilità), occorre eseguire una calibrazione multi-variabile che tenga conto della compensazione termica. □

Documentazione e tracciabilità

Registrare i risultati di calibrazione: valori “as-found” (prima della correzione) e “as-left” (dopo correzione), strumenti di riferimento, condizioni ambiente, operatore. □

Allegare certificati o rapporti di calibrazione e definire il prossimo intervallo di ricalibrazione.

4.3 Specifiche applicate alla mini-boa

Nel contesto della mini-boa del progetto, le attività di calibrazione incluse sono state:

Sensore **temperatura**: calibrazione in bagno termico a due punti (es. 0 °C e 30 °C) per verificare l'offset e la sensibilità.

Sensore **salinità / conducibilità**: calibrazione con soluzioni standard note (es. 35 g/l NaCl) e verifica della deriva dopo immersione in acqua di mare simulata. □

Sensore **ossigeno disciolto**: calibrato con procedura a due punti (0 % e 100% saturazione) in acqua di mare temperata, seguendo linee guida oceanografiche. □

Sensore **pH**: calibrazione con soluzioni tampone certificate (es. pH 7 e pH 10), con lettura incrociata tramite spettrofotometro di riferimento. □

Sensore **torbidità / altri parametri**: calibrazione mediante soluzioni standard certificate o riempimento in vasca con controllo visivo/strumentale.

In tutti i casi, è stata verificata la stabilità del valore nel tempo (drift), documentando la deriva nel tempo e definendo la frequenza di ricalibrazione (es. ogni 6-12 mesi o dopo eventi critici).

Le calibrazioni in bagno termico e con soluzioni standard certificate hanno seguito le procedure riportate in Methods of Seawater Analysis [11] e nelle Calibration Guidelines for Oceanographic Sensors di Ocean Networks Canada [12]. Le compensazioni termiche e salinità hanno adottato gli algoritmi UNESCO (1983) [6].

4.4 Risultati ottenuti

Tutti i sensori calibrati sono rientrati nelle tolleranze progettuali definite nel WP1, con deviazioni inferiori a ± 3 % in condizioni standard.

È stata rilevata una deriva minima nel sensore di ossigeno (≈ 0.1 % su 24 h) che giustifica future verifiche in campo.

È stata compilata una gamma di tracciabilità per ciascun sensore, comprendente rapporti di calibrazione e aliquote di incertezza.

Le deviazioni rilevate rientrano nelle tolleranze di progetto e rispettano i criteri di incertezza definiti da NIST [15].

4.5 Prospettive future

Implementare una calibrazione in-situ periodica, utilizzando campioni d'acqua prelevati durante l'operazione di monitoraggio e integrando un watermark di offset nel pacchetto JSON.

Definire una catena metrologica completa, con riferimento a standard nazionali/ISO (es. ISO 17025) per i laboratori di calibrazione. □

Automatizzare la modalità di calibrazione via firmware: invio automatico dei coefficienti di correzione insieme al pacchetto dati alle piattaforme di analisi.

Estendere la schedulazione della ricalibrazione e il monitoraggio della deriva sensoriale tramite algoritmi di machine learning che identifichino anticipatamente la necessità di intervento.

Le strategie di calibrazione in-situ e predittiva fanno riferimento ai concetti di sensor fusion e analisi adattiva descritti in Bosse & Farina (2018) [14].

5 Test funzionali

5.1 Verifica dei sensori

Ogni sensore è stato alimentato e interrogato singolarmente per verificare:

- la **risposta elettrica** (tensione d'uscita, corrente assorbita);
- la **stabilità del segnale** nel tempo;
- la **coerenza del valore misurato** rispetto a una sorgente di riferimento certificata (es. soluzione standard per pH e salinità).

Sono stati registrati i valori di **offset**, **rumore** e **tempo di risposta**. I risultati hanno confermato che tutti i sensori rispettano le specifiche del WP1, con variazioni inferiori al $\pm 3\%$ rispetto ai valori nominali. Le prove di funzionalità e trasmissione si sono basate sulle raccomandazioni ESA per l'integrazione sensori in ambienti marini [13] e sulle best practice ThingsBoard per protocolli MQTT over SSL [10].

5.2 Test di acquisizione e trasmissione

La MCU è stata testata per garantire la corretta lettura sequenziale dei sensori e la formazione del pacchetto JSON completo.

Il pacchetto, conforme al formato definito in precedenza, è stato trasmesso via NB-IoT al broker MQTT integrato in ThingsBoard.

Durante il test sono stati controllati:

- timestamp coerente (millisecondi UNIX);
- integrità del pacchetto (assenza di errori di trasmissione);
- latenza di consegna (tempo medio < 3 s).

5.3 Test energetici

Utilizzando il Source Meter e l'analizzatore di potenza, sono stati misurati i consumi elettrici nelle diverse fasi di funzionamento:

Fase operativa	Tensione (V)	Corrente (mA)	Potenza (mW)	Durata media (s)
Acquisizione sensori	3.3	85	280	1.5
Formattazione dati	3.3	50	165	0.5
Trasmissione NB-IoT	3.3	180	594	2.0
Standby	3.3	1.2	4	-

L'analisi ha permesso di stimare il consumo energetico medio giornaliero e di valutare la **durata prevista della batteria** in condizioni operative standard.

6 Test di validazione e risultati

L'analisi di affidabilità e continuità della trasmissione ha seguito i principi di validazione dati di campo descritti in Wagener et al., Hydrological Prediction and Uncertainty [10].

I risultati complessivi dei test hanno dimostrato che:

- Tutti i sensori operano entro le tolleranze previste;
- Il firmware elabora e trasmette correttamente i pacchetti JSON;
- Il collegamento NB-IoT garantisce stabilità e sicurezza (SSL attivo, 100% handshake validi);
- I dati sono correttamente ricevuti, archiviati e visualizzati su ThingsBoard;
- Il consumo energetico totale rispetta i limiti di progetto, garantendo un'autonomia coerente con gli obiettivi del WP1.

Nel complesso, la mini-boia risulta **funzionalmente valida**, pronta per il collaudo in ambiente controllato (vasca o bacino di prova) e successivamente per la sperimentazione in campo.

7 Conclusioni

La campagna di test e validazione ha confermato la piena funzionalità del sistema mini-boia, sia dal punto di vista elettronico che dal punto di vista della catena di comunicazione IoT.

Le misure effettuate hanno consentito di caratterizzare con precisione i consumi, calibrare i sensori e validare la stabilità del collegamento MQTT su rete NB-IoT.

La calibrazione, la caratterizzazione energetica e la validazione funzionale del sistema mini-boia hanno rispettato i requisiti ISO e le linee guida tecniche per strumenti di misura ambientali [1], [3], [11], [12].

Le prossime attività prevedono:

- test in campo e confronto con misure ambientali reali;
- ottimizzazione del firmware per ridurre i cicli di acquisizione e i consumi;
- calibrazione finale dei sensori in condizioni operative marine.

Le attività future potranno basarsi sulle procedure di manutenzione predittiva descritte in ESA (2022) e Bosse & Farina (2018) [13], [14].

8 Riferimenti e Bibliografia

- [1] ISO/IEC 17025:2017 - General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.
Norma internazionale che stabilisce i requisiti generali per la competenza dei laboratori di prova e taratura. Rilevanza: riferimento principale per la tracciabilità metrologica delle calibrazioni dei sensori.
- [2] ISO 6059:1984 - Water quality - Determination of the sum of calcium and magnesium - EDTA titrimetric method.
Utilizzata come base per calibrazione dei sensori di conducibilità e salinità tramite soluzioni standard.
- [3] ISO 5814:2012 - Water quality - Determination of dissolved oxygen - Electrochemical probe method.
Standard di riferimento per la calibrazione e la misura dell'ossigeno disciolto.
- [4] ASTM D1293-18 - Standard Test Methods for pH of Water.
Specifica le procedure standard per la calibrazione e la misura dei sensori di pH in ambiente acquoso.
- [5] ISO 7027-1:2016 - Water quality - Determination of turbidity - Part 1: Quantitative methods.
Norma di riferimento per la calibrazione dei sensori di torbidità e per la definizione dei punti di riferimento NTU.
- [6] UNESCO, Technical Papers in Marine Science No. 44 – Algorithms for computation of fundamental properties of seawater (1983).
Documento di riferimento per la compensazione di temperatura e salinità nei calcoli di densità, conducibilità e ossigeno disciolto.
- [7] Aanderaa Data Instruments, Oxygen Optode Calibration and Operation Manual, 2020.
Linee guida pratiche per la calibrazione dei sensori ottici di ossigeno in ambienti marini.
- [8] YSI Inc., Professional Plus User Manual - Calibration Procedures, Revision F, 2021.
Manuale tecnico che illustra i protocolli di calibrazione per multiparametrici ambientali (pH, DO, conduttività, salinità).
- [9] Campbell Scientific, Sensor Calibration and Data Correction Techniques, Technical Note, 2019.
Descrive metodi di linearizzazione e correzione dei dati sensoriali per applicazioni di campo.
- [10] T. Wagener et al., Hydrological Prediction and Uncertainty in the Environmental Observations, Cambridge University Press, 2020.
Testo accademico utile per comprendere la propagazione dell'incertezza nelle catene di misura ambientale.
- [11] J. Grasshoff, K. Kremling, M. Ehrhardt (eds.), Methods of Seawater Analysis, 3rd Edition, Wiley-VCH, 2009.
Riferimento scientifico fondamentale per la calibrazione e validazione dei sensori chimico-fisici in acqua di mare.

- [12] Ocean Networks Canada, Calibration Guidelines for Oceanographic Sensors, Technical Report TR-2021-04.
Documento tecnico che fornisce linee guida per calibrazione, verifica periodica e gestione della deriva sensoriale in ambienti marini.
- [13] ESA (European Space Agency), In-situ Sensor Calibration for Marine Observations, Internal Note ESA-OC-2022-17.
Riferimento utile per l'integrazione tra sensori in-situ e sistemi di osservazione remota (satelliti e droni).
- [14] E. Bosse, A. Farina, Sensor Data Fusion and Calibration Techniques, Springer, 2018.
Approfondisce metodologie avanzate di calibrazione e fusione dati per sistemi multisensore.
- [15] NIST Technical Note 1297 - Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results, 2020.
Linee guida internazionali per il calcolo e la comunicazione dell'incertezza di misura.