



**Politecnico  
di Torino**

## **Tesi Meritoria**

---

**Corso di Laurea Magistrale Architettura per la sostenibilità.**

# **"Qualità ambientale interna e percezione del comfort degli occupanti negli uffici: debug del questionario PROMET&O, progettazione di applicazioni mobili e uno studio sul campo a breve termine negli uffici"**

**Relatore/Correlatore/i**

Prof. Arianna Astolfi  
Prof. Antonio Servetti  
Dr. Virginia Isabella Fissore

**Candidata/o/i**

Reyhaneh Khosravi  
S300267

**Settembre 2024**

## Abstract

Secondo i dati più recenti, la maggior parte delle persone trascorre la maggior parte del tempo in spazi chiusi. Il nostro benessere e la nostra produttività sono significativamente influenzati dal clima interno che sperimentiamo. Gli inquinanti indoor non solo hanno un impatto sulla nostra salute fisica, ma svolgono anche un ruolo nell'influenzare il nostro benessere psicologico. Fattori come luce, temperatura, umidità e rumore contribuiscono a questa complessa interazione, influenzando sia il nostro stato fisico che quello mentale. Ciò sottolinea l'importanza di garantire una qualità ambientale interna (IEQ) soddisfacente nei suoi vari domini. Gli standard e le certificazioni sviluppati nel corso degli anni propongono un vasto numero di possibili parametri e indici da monitorare.

Adottando un approccio multidisciplinare, il progetto PROMET&O (Proactive Monitoring System for Indoor Environmental Quality & Comfort) coinvolge esperti in architettura, fisica edilizia, ingegneria elettronica e ingegneria informatica per sviluppare in modo collaborativo un multisensore innovativo e preciso per il monitoraggio in loco dell'IEQ negli uffici. Il multisensore PROMET&O è specificamente mirato a migliorare la salute, il benessere e la produttività complessiva degli occupanti. Questo progetto è una collaborazione tra vari dipartimenti del Politecnico di Torino, tra cui DAD (Dipartimento di Architettura), DENERG (Dipartimento di Energia), DIATI (Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture), DET (Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni) e DAUIN (Dipartimento di Ingegneria del Controllo e dell'Informatica).

Questa tesi, intitolata "Qualità ambientale interna e percezione del comfort degli occupanti negli uffici: debug del questionario PROMET&O, progettazione dell'applicazione mobile e uno studio sul campo a breve termine in vari uffici", si concentra sul monitoraggio della qualità dell'ambiente interno e sulla comprensione della percezione del comfort degli occupanti negli ambienti d'ufficio. Lo studio prevede tre fasi principali: debug e revisione del questionario web PROMET&O e progettazione della dashboard per perfezionare lo strumento per raccogliere feedback soggettivi, progettazione e prototipazione dell'applicazione mobile per migliorare l'interazione dell'utente e la raccolta dati e conduzione di una misurazione sul campo a breve termine nel Polito Living Lab, nel Polito audio Space Lab, Azienda open space e Camera da letto di residenza universitaria. Lo studio sul campo, che include l'implementazione di dispositivi multisensore e la raccolta di dati oggettivi, mira a fornire approfondimenti sull'ottimizzazione delle condizioni ambientali interne per migliorare il comfort, la salute e la produttività degli occupanti.

L'approccio della tesi si conclude riassumendo i risultati chiave e le loro implicazioni per il lavoro futuro. In primo luogo, il wireframe progettato per l'applicazione mobile, che è stato sviluppato per fornire un'interfaccia user-friendly e una navigazione

intuitiva. Questo prototipo iniziale fungerà da base per le iterazioni future, consentendo un continuo perfezionamento e miglioramento.

Per garantire agli utenti un comodo accesso tramite i loro dispositivi mobili, abbiamo deciso di riprogettare il questionario online in modo che sia completamente reattivo a diverse dimensioni dello schermo. Questa riprogettazione è fondamentale per consentire agli utenti di ricevere senza problemi tutte le informazioni sulla qualità ambientale interna, le informazioni personali e i dati calcolati dal multisensore PROMET&O. Rendere il questionario online reattivo e intuitivo su tutti i dispositivi è fondamentale per il nostro approccio. Un design reattivo garantisce che gli utenti possano interagire facilmente e completare il questionario sugli smartphone, offrendo un'esperienza utente coerente ed efficiente indipendentemente dal dispositivo utilizzato. Questo miglioramento non solo migliora l'accessibilità, ma assicura anche che la raccolta dei dati sia accurata e completa, catturando efficacemente il feedback degli utenti. Quindi mi immergo nel design dell'interfaccia utente (UI) e dell'esperienza utente (UX) dell'app mobile, adattato dal design della pagina web per garantire reattività e facilità di accesso per gli UTENTI che rispondono al questionario. L'obiettivo è adattare il design per adattarsi senza problemi agli schermi dei telefoni cellulari, facilitando la navigazione e l'interazione semplici. Integrando questi principi UI/UX e Gestalt, l'applicazione mobile ottimizza il coinvolgimento dell'utente, dà priorità alla chiarezza e garantisce una navigazione efficiente di informazioni e attività complesse.

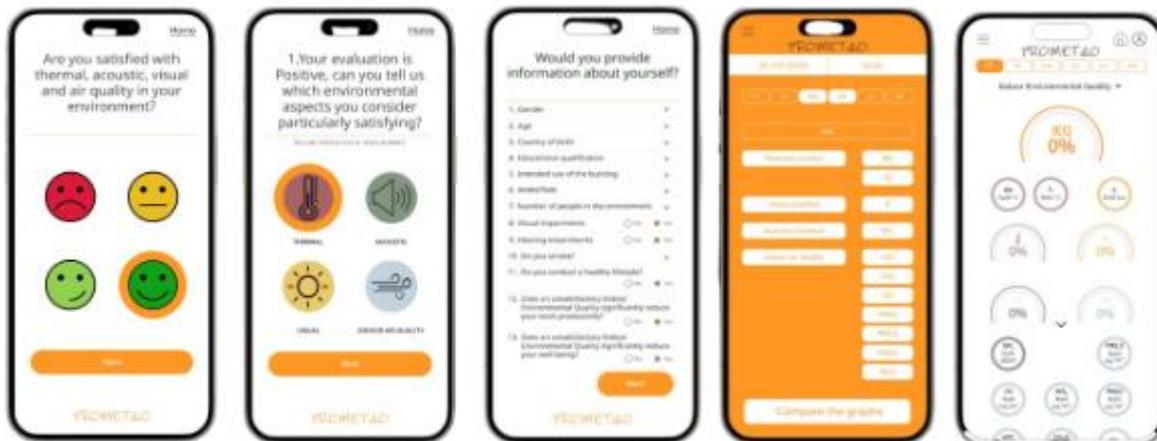


Fig. 1. Prototipazione del design dell'applicazione mobile

In secondo luogo, i risultati di vari esperimenti hanno fornito informazioni significative sul comportamento dei multisensori PROMET&O in diverse impostazioni di misurazione. Questi esperimenti sono stati fondamentali per comprendere come i singoli sensori si comportano in diverse condizioni ambientali e come più sensori possono essere integrati per fornire soluzioni di monitoraggio complete. Ad esempio, è stato osservato che il sensore di CO nel multisensore 10 ha registrato costantemente livelli significativamente più elevati rispetto ad altri sensori, indicando un potenziale problema con la calibrazione o la codifica che necessita

di ulteriori indagini. Inoltre, il multisensore 3 ha mostrato livelli di CO<sub>2</sub> più elevati in diversi esperimenti, suggerendo che questo sensore potrebbe essere più sensibile o che si è verificato un potenziale problema con la calibrazione o la codifica. Queste osservazioni guidano la fase successiva di debug e sviluppo, consentendo miglioramenti mirati sia ai singoli sensori che alle configurazioni multisensore assemblate.

Inoltre, è stato notato che il sensore del livello di pressione sonora ha mostrato costantemente picchi ogni ora, il che potrebbe essere un'indicazione di un suono generato dal multisensore stesso. Questa scoperta suggerisce che potrebbe esserci rumore meccanico o elettronico all'interno dell'assemblaggio del sensore, che potrebbe influire sulla precisione delle misurazioni del suono. Identificare e affrontare questi problemi è fondamentale per garantire l'affidabilità dei dati dei sensori.

Nel complesso, questi risultati sottolineano l'importanza di test e sperimentazioni approfondite nello sviluppo della tecnologia dei sensori. Identificando comportamenti e anomalie specifici, possiamo adattare meglio le nostre soluzioni per soddisfare le sfide uniche presentate da contesti diversi.

Quando si eseguono misurazioni sul campo della qualità ambientale interna negli uffici, è essenziale considerare diversi fattori per garantire un'analisi e un'interpretazione accurate dei dati.

- **Posizionamento dei sensori:** posizionare i multisensori strategicamente in tutto lo spazio dell'ufficio per catturare le variazioni di IEQ in diverse aree. Considerare fattori come la vicinanza a fonti di inquinamento, prese di ventilazione e densità degli occupanti quando si posizionano i multisensori.
- **Raccolta dati:** monitorare costantemente i parametri IEQ per un periodo prolungato per catturare le variazioni durante il giorno. Assicurarsi che i multisensori siano calibrati regolarmente per mantenere l'accuratezza.
- **Sondaggi degli occupanti:** integrare i dati oggettivi IEQ con feedback soggettivi da parte dei dipendenti dell'ufficio tramite questionari online. Raccogliere informazioni sulle percezioni di comfort degli occupanti e sulla soddisfazione per l'ambiente interno.
- **Analisi dei dati:** analizzare i dati raccolti utilizzando metodi statistici per identificare tendenze, correlazioni e potenziali problemi con IEQ. Confrontare le misurazioni oggettive con le risposte soggettive per ottenere informazioni sulla relazione tra condizioni ambientali e comfort degli occupanti.
- **Strategie di intervento:** sulla base dei risultati dell'analisi, sviluppare strategie di intervento per affrontare eventuali carenze identificate o aree di miglioramento nell'IEQ. Ciò può comportare la regolazione delle impostazioni HVAC, il miglioramento della ventilazione, l'implementazione di purificatori d'aria o la modifica di materiali edili e arredi.

- **Monitoraggio continuo:** stabilire un sistema per il monitoraggio continuo e la rivalutazione periodica dell'IEQ per tracciare i miglioramenti nel tempo e garantire la soddisfazione e il benessere continui degli occupanti.

Seguendo questi passaggi, è possibile misurare efficacemente l'IEQ negli uffici e implementare strategie mirate per creare un ambiente interno più sano e confortevole per i lavoratori d'ufficio.

La misurazione sul campo della qualità ambientale interna nel Living Lab del Politecnico di Torino e nell'A.S.L (Audio Space Lab), nell'open space aziendale e nella camera da letto della residenza universitaria (In-Room) utilizzando i multisensori PROMET&O comporta la raccolta di dati oggettivi per valutare in modo completo l'impatto dell'ambiente interno sugli occupanti. La raccolta di dati oggettivi comporta l'uso di multisensori PROMET&O per misurare vari parametri ambientali. Ciò include l'implementazione dei sensori, la registrazione dei dati, il recupero dei dati e l'analisi dei dati.

**1. Esperimento sul campo Living Lab:** i dati raccolti dai multisensori nello studio Living Lab forniscono un'analisi approfondita delle condizioni ambientali utilizzando multisensori, rivelando notevoli deviazioni nelle misurazioni di temperatura, umidità e qualità dell'aria rispetto ai dispositivi di riferimento. È degno di nota che la finestra sia fissa e senza tenda.

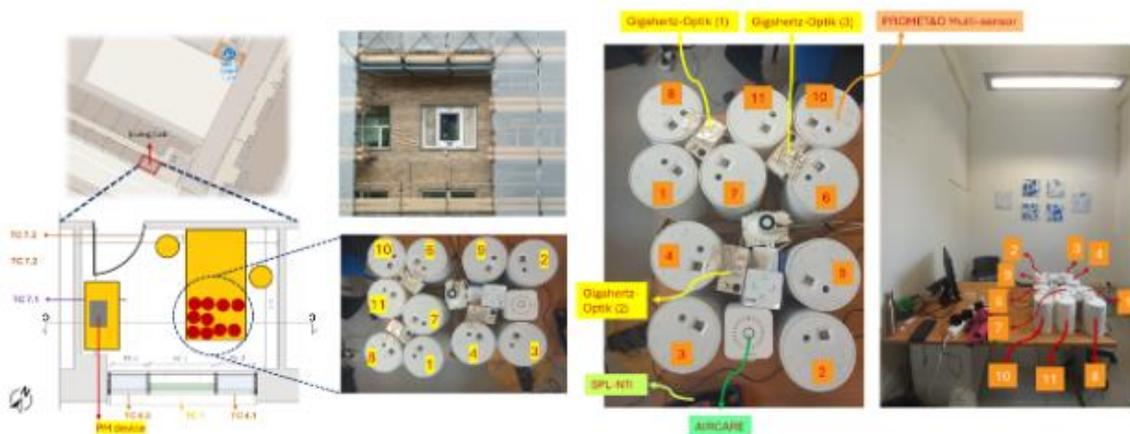


Fig. 2. Ambiente di laboratorio vivente e posizionamento multisensore

**Conclusione per l'esperimento Living Lab:** il monitoraggio ambientale Living Lab mediante multi-sensori ha rivelato deviazioni costanti nelle letture di temperatura, CO<sub>2</sub> e particolato rispetto ai dispositivi di riferimento. Inoltre, le discrepanze nei valori di livello di pressione sonora e di illuminamento tra diversi sensori evidenziano la natura dinamica dell'ambiente Living Lab, sottolineando la necessità di un riferimento incrociato dei dati dei sensori per mantenere l'accuratezza e l'affidabilità dei dati.

**2. Esperimento sul campo dell'Audio Space Lab:** i dati raccolti dai multisensori dell'Audio Space Lab rivelano diverse osservazioni chiave sulle condizioni ambientali.

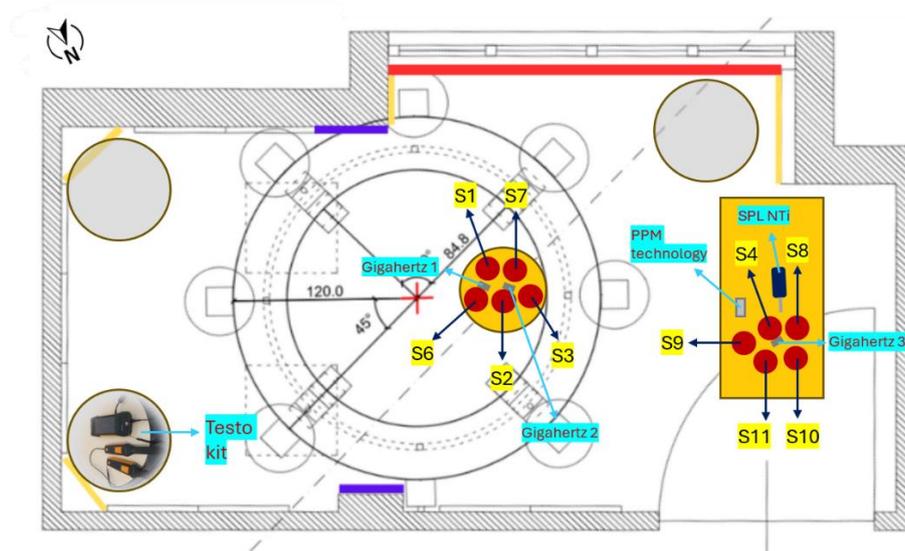


Fig. 3. Ambiente di laboratorio spaziale audio e posizionamento multisensore

**Conclusione per l'esperimento Audio Space Lab:** i dati di monitoraggio ambientale dell'Audio Space Lab evidenziano diverse discrepanze tra i multisensori e i dispositivi di riferimento, in particolare per quanto riguarda temperatura, illuminazione, livelli di CO. Queste incongruenze possono essere dovute al posizionamento del sensore, a problemi di calibrazione o a fattori ambientali esterni che influenzano le letture. Inoltre, gli alti livelli di CO rilevati dai multisensori, nonostante la lettura di riferimento zero, suggeriscono che potrebbero esserci malfunzionamenti del sensore che devono essere affrontati. Nel complesso, i risultati richiedono una revisione delle strategie di calibrazione e posizionamento del sensore per garantire un monitoraggio affidabile delle condizioni ambientali.

**3. Esperimento sul campo Open Space aziendale:** sulla base dei dati raccolti da 2 diversi uffici in cinque giorni di esperimenti negli esperimenti aziendali, sono emerse diverse tendenze e osservazioni chiave in merito alle prestazioni dei multisensori su diversi parametri ambientali.

**Conclusione per l'esperimento Open Space aziendale:** ci sono notevoli differenze tra i due ambienti in termini di orientamento della stanza, numero di occupanti che possono causare temperature, umidità e qualità dell'aria diverse, con l'ufficio n. 2 che generalmente registra livelli di umidità, particolato e pressione sonora più elevati. La variabilità nelle letture dei sensori suggerisce la necessità di ulteriori indagini sulla calibrazione e il debug dei sensori per garantire un monitoraggio accurato. Gli sviluppi futuri dovrebbero concentrarsi sull'affrontare queste incongruenze e sull'ottimizzazione delle configurazioni dei sensori per un monitoraggio ambientale più affidabile e preciso.

**4. Esperimento in camera Riepilogo:** l'esperimento in camera mirava a valutare le condizioni ambientali utilizzando due multi-sensori per diversi giorni, concentrandosi su temperatura, umidità, qualità dell'aria e l'impatto di variabili quali luce naturale, luce artificiale e un test delle candele. I risultati rivelano tendenze coerenti nelle letture dei sensori e cambiamenti significativi in condizioni specifiche, evidenziando le dinamiche della qualità dell'aria interna e dei parametri ambientali.

**Conclusione per l'esperimento in camera:** l'esperimento in camera dimostra la variabilità e la sensibilità delle condizioni ambientali interne a diversi fattori quali posizione della finestra, esposizione alla luce e attività come accendere una candela. Le discrepanze tra le letture dei sensori, in particolare per CO<sub>2</sub>, PM e CO, sottolineano l'importanza di utilizzare più sensori per una valutazione completa della qualità dell'aria. I risultati sottolineano la necessità di una ventilazione e un monitoraggio adeguati per mantenere condizioni di aria interna sane, soprattutto in scenari in cui vengono superate le soglie ambientali.

**Conclusione per il test In-Room Candle:** durante il test della candela, diversi parametri hanno mostrato cambiamenti significativi in entrambi i multisensori, principalmente nei livelli di particolato, CO<sub>2</sub> e formaldeide. Nel complesso, il test della candela ha dimostrato un notevole aumento del particolato, evidenziando l'impatto dell'accensione di una candela sulla qualità dell'aria interna. Anche i livelli di CO<sub>2</sub> aumentano, sebbene i livelli di monossido di carbonio e TVOC non abbiano mostrato cambiamenti significativi durante questo test.

## Riepilogo esecutivo del progetto e azioni finali per i miglioramenti di multisensori e ambienti:

L'indagine e l'ottimizzazione della calibrazione e delle configurazioni dei sensori miglioreranno l'accuratezza del monitoraggio ambientale e garantiranno una migliore gestione della qualità dell'aria e delle condizioni di comfort. L'utilizzo di più sensori garantisce una valutazione completa dell'IEQ e le regolazioni dei sistemi di ventilazione e monitoraggio contribuiranno a mantenere condizioni di aria interna sane.

È possibile intraprendere azioni per il miglioramento di multisensori da tutti i risultati degli esperimenti:

- **Temperatura:** calibrare i sensori di temperatura per affrontare sia la sovrastima (sensori 1, 6, 10) sia la sottostima (sensori 2, 4 e 6).
  - **Umidità relativa:** calibrare i sensori di umidità relativa in tutti i multisensori per garantire che riflettano valori accurati, poiché registrano costantemente letture inferiori rispetto ai dispositivi di riferimento.
  - **Illuminamento:** calibrare i sensori 1, 10 e 4 per correggere i problemi di sovrastima e ricalibrare il sensore 11 per l'accuratezza.
  - **Livello di pressione sonora:** calibrare i multisensori 2, 10 e 11 per allineare le letture ai livelli di riferimento.
  - **PM<sub>2.5</sub>:** calibrare il sensore 10 per la sovrastima e il sensore 8 per la sottostima dei livelli di PM<sub>2.5</sub>.
  - **CO<sub>2</sub>:** calibrare il multisensore 3 per ridurre la sovrastima e i sensori 6, 7 e 10 per correggere la sottostima dei livelli di CO<sub>2</sub>.
  - **CO:** calibrare tutti i sensori di CO, poiché spesso non funzionano correttamente. Prestare particolare attenzione al sensore 10 per problemi di sovrastima.
  - **Formaldeide:** calibrare i sensori 1, 3, 6 e 10 per correggere la sottostima e assicurarsi che il sensore 4 sia calibrato correttamente per evitare la sovrastima.
  - **TVOC:** controllare tutti i sensori TVOC rispetto a un dispositivo di riferimento, poiché registrano costantemente valori bassi.
-