



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE  
MARCHE FACOLTÀ DI INGEGNERIA  
Corso di laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**Studio e calibrazione di sensori per il  
monitoraggio della qualità dell'aria**

Analysis and calibration of sensors for air  
quality monitoring

Relatore: **Prof. Gian Marco Revel**

Candidato: **Scarlatti Alessandro**

Correlatore: **Dott. Ing. Nicole Morresi**

Correlatore: **Dott. Ing. Riccardo Naccarelli**

Anno accademico 2022/2023

# INDICE

<b>1. INTRODUZIONE</b> .....	6
<b>1.1. Calibrazione dei sensori low-cost (misurazioni indoor) e verifica dell'affidabilità dei sensori del progetto Socio-Bee (misurazioni outdoor)</b> .....	6
<b>1.2. Progetto Socio-Bee per la misura della qualità dell'aria</b> .....	7
<b>2. STATO DELL'ARTE</b> .....	18
<b>2.1. La misura della qualità dell'aria</b> .....	18
<b>2.2. Sensori low-cost per la misura della qualità dell'aria</b> .....	20
<b>3. MATERIALI E METODI</b> .....	22
<b>3.1. Misure indoor di qualità dell'aria</b> .....	22
<b>3.1.1. Set-up sperimentale</b> .....	24
<b>3.1.2. Protocollo di misura</b> .....	32
<b>3.1.3. Analisi dati</b> .....	33
<b>3.1.4. Risultati</b> .....	35
<b>3.2. Misura della qualità dell'aria nel progetto Socio-Bee</b> .....	39
<b>3.2.1. Set-up di misura per le misurazioni outdoor</b> .....	40
<b>3.2.1.1. Caratteristiche e specifiche dei sensori Socio-Bee</b> .....	43
<b>3.2.2. Campagne di misura</b> .....	46
<b>3.2.3. Analisi dati</b> .....	51
<b>3.2.4. Risultati delle campagne</b> .....	52
<b>4. CONCLUSIONI</b> .....	62
<b>5. BIBLIOGRAFIA</b> .....	64

## INDICE DELLE FIGURE

- **Figura 1.** Logo del progetto Socio-Bee
- **Figura 2 e 3.** Dati statistici raccolti dalla World Health Organization (WHO) riguardanti la qualità dell'aria
- **Figura 4.** PM<sub>2.5</sub> e PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, CO
- **Figura 5.** PM<sub>2.5</sub> e PM<sub>10</sub> – rispettivi valori dei diametri e confronti di questi con il diametro di un capello umano e con il diametro della sabbia fine
- **Figura 6.** Suddivisione secondo il gradiente termico verticale che individua quattro strati fondamentali dell'atmosfera
- **Figura 7.** Politica basata sull'evidenza (EBP)
- **Figura 8.** Consorzio del progetto Socio-Bee: 18 partner provenienti da 7 paesi europei
- **Figura 9.** Collaborazione tra volontari, imprese, cittadini e decisori
- **Figura 10 e 11.** Stazioni dell'ARPAM di monitoraggio dell'aria, fisse, situate presso la stazione ferroviaria e il Parco della Cittadella di Ancona
- **Figura 12.** Concentrazioni medie annue di PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> e NO<sub>2</sub> [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] e dei mesi maggio-ottobre di O<sub>3</sub> [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ], anno 2018
- **Figura 13.** In figura viene illustrata dall'alto la disposizione dei LCS e del CA – entrambi a uno stesso livello di altezza – durante la misurazione indoor all'interno di un box di plastica e le loro relative connessioni esterne a un PC
- **Figura 14.** Incenso che si consuma bruciando ed emanando fumo
- **Figura 15.** PMSA003I
- **Figura 16.** GP2Y101AUOF (Dust Sensor)
- **Figura 17.** Schema interno del GP2Y101AUOF (Dust Sensor)
- **Figura 18.** Arduino Mega2560
- **Figura 19.** PC che riceve i dati misurati dai sensori durante una prova di misurazione indoor
- **Figura 20.** Singolo collegamento tra PMSA003I e ArduinoMega2560
- **Figura 21.** Singolo collegamento tra GP2Y101AUOF (Dust Sensor) e ArduinoMega2560
- **Figura 22.** Contemporaneo collegamento di GP2Y101AUOF (Dust Sensor) e di PMSA003I all'Arduino Mega2560
- **Figura 23.** Comfort Air in modalità ON, collegato a una presa di corrente. Il colore rosso in figura indica una scarsa qualità dell'aria
- **Figura 24.** Box di plastica (56cm x 38 cm x 26,5 cm)
- **Figura 25.** Incenso utilizzato per il test
- **Figura 26.** Test (misurazione indoor) durante il suo svolgimento
- **Figura 27.** Andamento tipico di un esponenziale con asintoto orizzontale pari a "1"
- **Figura 28.** Andamento di PM<sub>2.5</sub> misurato con il Comfort Air
- **Figura 29.** Andamento di PM<sub>2.5</sub> misurato con il PMSA003I (LCS)
- **Figura 30.** Andamento di PM<sub>2.5</sub> a confronto: il LCS vede modificare la sua frequenza di campionamento a 1 minuto
- **Figura 31.** Retta di regressione lineare della misurazione indoor
- **Figura 32.** Istogramma dei residui per la misurazione indoor
- **Figura 33.** Andamento di PM<sub>2.5</sub> rilevato dai due sensori a confronto prima che il LCS arrivi a saturazione
- **Figura 34.** Retta di regressione lineare della misurazione indoor prima che il LCS arrivi a saturazione

- **Figura 35.** Istogramma dei residui per la misurazione indoor prima che il LCS arrivi a saturazione
- **Figura 36.** Modalità di misurazione Socio-Bee
- **Figura 37.** Design dei sensori Socio-Bee
- **Figura 38.** Power bank
- **Figura 39.** Piattaforma Socio-Bee
- **Figura 40.** Campagna realizzata correttamente e completata
- **Figura 41.** Dispositivo Android (tablet e smartphone)
- **Figura 42.** Alcune schermate del dispositivo Android di chi misura con il sensore Socio-Bee
- **Figura 43.** Sensori interni al sensore Socio-Bee
- **Figura 44.** Dimensioni del sensore Socio-Bee
- **Figura 45.** Diverse modalità con cui lavora il sensore che rileva il  $PM_{2,5}$
- **Figura 46.** Campagna 1 effettuata presso la stazione ferroviaria di Ancona
- **Figura 47.** Campagna 2.1 effettuata presso Viale della Vittoria (Ancona)
- **Figura 48.** Campagna 2.2 effettuata presso Viale della Vittoria (Ancona)
- **Figura 49.** Campagna 3.1 effettuata presso il Parco della Cittadella di Ancona
- **Figura 50.** Campagna 3.2 effettuata presso il Parco della Cittadella di Ancona
- **Figura 51.** Andamenti nel tempo di  $PM_{2,5}$ ,  $NO_2$  e  $O_3$  (campagna 1) per il rispettivo sensore Socio-Bee
- **Figura 52.** Confronto delle medie dei valori misurati da ciascun sensore (campagna 1)
- **Figura 53.** Errore percentuale del sensore Socio-Bee rispetto al sensore dell'ARPAM della stazione di Ancona (campagna 1)
- **Figura 54.** Deviazione standard del sensore Socio-Bee (campagna 1)
- **Figura 55.** Andamenti nel tempo di  $PM_{2,5}$ ,  $NO_2$  e  $O_3$  (campagna 2.1) per i rispettivi due sensori Socio-Bee
- **Figura 56.** Andamenti nel tempo di  $PM_{2,5}$ ,  $NO_2$  e  $O_3$  (campagna 2.2) per il rispettivo sensore Socio-Bee
- **Figura 57.** Confronto delle medie dei valori misurati da ciascun sensore (campagna 2)
- **Figura 58.** Errore percentuale dei sensori Socio-Bee rispetto al sensore dell'ARPAM della stazione di Ancona (campagna 2)
- **Figura 59.** Errore percentuale dei sensori Socio-Bee rispetto al sensore dell'ARPAM del Parco della Cittadella di Ancona (campagna 2)
- **Figura 60.** Errore percentuale del sensore S2 (60 mt) rispetto al sensore S1 (60 mt), entrambi appartenenti alla campagna 2.1
- **Figura 61.** Errore percentuale del sensore S3 (120 mt) rispetto al sensore S2 (60mt), il primo appartenente alla campagna 2.2 e il secondo appartenente alla campagna 2.1
- **Figura 62.** Errore percentuale del sensore S3 (120 mt) rispetto al sensore S1 (60 mt), il primo appartenente alla campagna 2.2 e il secondo appartenente alla campagna 2.1
- **Figura 63.** Deviazione standard dei sensori Socio-Bee appartenenti alla campagna 2
- **Figura 64.** Andamenti nel tempo di  $PM_{2,5}$ ,  $NO_2$  e  $O_3$  (campagna 3.1) per il rispettivo sensore Socio-Bee
- **Figura 65.** Andamenti nel tempo di  $PM_{2,5}$ ,  $NO_2$  e  $O_3$  (campagna 3.2) per il rispettivo sensore Socio-Bee
- **Figura 66.** Confronto delle medie dei valori misurati da ciascun sensore (campagna 3)
- **Figura 67.** Errore percentuale dei sensori Socio-Bee rispetto al sensore dell'ARPAM del Parco della Cittadella di Ancona (campagna 3)

- **Figura 68.** Errore percentuale del sensore S2 (50 mt) rispetto al sensore S1 (30 mt), il primo appartenente alla campagna 3.1 e il secondo appartenente alla campagna 3.2
- **Figura 69.** Deviazione standard dei due sensori Socio-Bee appartenenti alla campagna 3

## INDICE DELLE TABELLE

- **Tabella 1.** Specifiche del sensore PMSA003I
- **Tabella 2.** Specifiche del sensore GP2Y101AUOF (Dust Sensor)
- **Tabella 3.** Massa complessiva del sensore Socio-Bee
- **Tabella 4.** Modalità di misurazione del sensore che rileva PM<sub>2,5</sub>
- **Tabella 5.** Specifiche dei sensori che rilevano NO<sub>2</sub> e O<sub>3</sub>

# 1. INTRODUZIONE

Lo scopo di questa tesi è duplice. In primo luogo, saranno approfonditi i nuovi strumenti e tecniche per la misura ed il controllo della qualità dell'aria, in quanto secondo l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) l'inquinamento atmosferico è il maggior rischio ambientale per la salute umana. A questo proposito, per le misurazioni indoor, in ambienti interni come case, uffici, negozi, etc., le prestazioni dei sensori low-cost (LCS) in commercio saranno valutate rispetto alle prestazioni di un sensore di riferimento, con conseguente valutazione dell'incertezza di misura degli LCS. La seconda attività avrà lo scopo di verificare l'affidabilità dei valori misurati dai sensori del progetto Socio-Bee attraverso il confronto con i valori misurati dai sensori dell'ARPAM (Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale Marche) situati presso la stazione dei treni di Ancona e presso il Parco della Cittadella di Ancona. Il confronto avverrà principalmente in termini di medie aritmetiche, calcolate sullo stesso intervallo di tempo, e in termini di errore percentuale commesso dai primi rispetto agli ultimi.

## 1.1. CALIBRAZIONE DEI SENSORI LOW-COST (MISURAZIONI INDOOR) E VERIFICA DELL'AFFIDABILITA' DEI SENSORI DEL PROGETTO SOCIO-BEE (MISURAZIONI OUTDOOR)

Inizialmente, venivano utilizzate delle stazioni fisse per la misura della qualità dell'aria; ora, invece, con le nuove tecnologie, vengono utilizzati sensori di piccole dimensioni, che offrono la possibilità di misurare i parametri opportuni in ogni punto dello spazio considerato, essendo mobili.

La calibrazione del sensore low-cost che misura la qualità dell'aria è il processo di correzione o regolazione delle misurazioni del sensore mediante giustapposizione con una concentrazione nota/di riferimento dei parametri. Essa si concentra sul miglioramento della precisione del sensore attraverso molteplici test in laboratorio e sul luogo di installazione; è una parte essenziale del controllo della qualità dei sensori in quanto aiuta a identificare ed eliminare le deviazioni dei dati. La procedura di calibrazione dei sensori low-cost avverrà utilizzando come riferimento sensore standard chiamato Comfort Air (CA), presso un ambiente interno stabilito da un box di plastica.

La seconda parte della tesi si concentrerà su misure outdoor allo scopo di valutare le prestazioni dei sensori, sviluppati nell'ambito del progetto europeo Socio-Bee. I sensori misurano la qualità dell'aria in termini di  $PM_{2.5}$ ,  $O_3$  e  $NO_2$  e lo scopo di questo lavoro è quello di confrontare i valori misurati da ciascun sensore, con i valori misurati dalle stazioni fisse di riferimento dell'ARPAM (Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale Marche) situate in diverse zone della città. Le misure sono effettuate attraverso delle campagne di misura, in prossimità delle stazioni di riferimento e nel centro della città. Le

valutazioni delle prestazioni sono fatte sulla base del calcolo dell'errore percentuale delle misure con i sensori portatili e la stazione di riferimento.

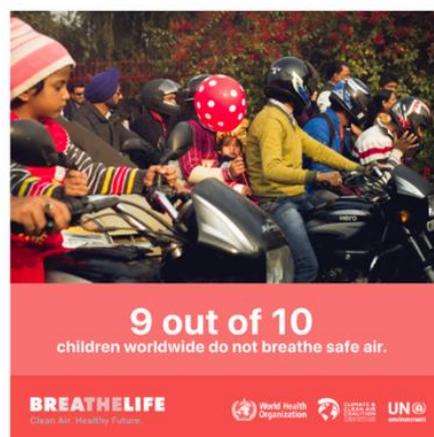
## 1.2. PROGETTO SOCIO-BEE PER LA MISURA DELLA QUALITA' DELL'ARIA



**FIGURA 1.** Logo del progetto Socio-Bee

In questo paragrafo descrive brevemente il progetto SOCIO-BEE, all'interno del quale si sviluppa questo lavoro di tesi (**FIGURA 1**). Nella maggior parte delle città la qualità dell'aria è migliorata (sostanzialmente) negli ultimi decenni. L'inquinamento atmosferico visibile e percepibile (fumo, polvere, smog) è fortunatamente scomparso da molte di esse grazie a iniziative locali, nazionali ed europee ma la qualità dell'aria rappresenta ancora un'immediata minaccia per la salute in quasi tutte le principali città. Avvengono ancora incidenti industriali o episodi di inquinamento, ma principalmente vediamo inquinanti del suolo derivanti da automobili, camion e autobus a base di combustibili fossili.

Quando parliamo di inquinamento atmosferico si intende l'introduzione di sostanze nocive nell'aria e la maggior parte degli inquinanti atmosferici sono gas o minuscole particelle, troppo piccole per essere viste (come PM<sub>2,5</sub> e PM<sub>10</sub>). Diventa chiaro che l'inquinamento atmosferico può essere dannoso, senza che si possa vederlo o annusarlo (**FIGURA 2 e 3**). Esso può essere infatti rilevato solo con opportuni sensori [1].



**FIGURA 2 e FIGURA 3.** Dati statistici raccolti dalla World Health Organization (WHO) riguardanti la qualità dell'aria

Chiariti i concetti sopra descritti, passiamo a capire quali sono i costituenti della famiglia degli inquinanti. Si tratta di cinque tipi di elementi nocivi:

- **Particelle finissime** che non possiamo vedere, annusare o gustare, chiamate **PM<sub>2,5</sub>** e **PM<sub>10</sub>**
- **Quattro** tipi di **gas nocivi**: **NO<sub>2</sub>**, **O<sub>3</sub>**, **SO<sub>2</sub>** e **CO**



**FIGURA 4.** PM<sub>2,5</sub> e PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, CO

#### - **PM<sub>2,5</sub> e PM<sub>10</sub>**

PM sta per “materiale particolato” (aerodisperso) e si intende l'insieme delle particelle atmosferiche solide e liquide sospese in aria ambiente. In particolare, il termine PM<sub>2,5</sub> identifica le particelle di diametro aerodinamico inferiore o uguale ai 2,5 µm, una frazione di dimensioni aerodinamiche minori del PM<sub>10</sub> e in esso contenuta. Il particolato PM<sub>2,5</sub> è detto anche “particolato fine”, denominazione contrapposta a “particolato grossolano” che indica tutte quelle particelle sospese con diametro aerodinamico maggiore di 2,5 µm o, all'interno della frazione PM<sub>10</sub>, quelle con diametro aerodinamico compreso tra 2,5 e 10 µm (**FIGURA 5**). Fonti del particolato fine sono un po' tutti i tipi di combustione, inclusi quelli dei motori di auto e motoveicoli, degli impianti per la produzione di energia, della legna per il riscaldamento domestico, degli incendi boschivi, dell'incenso e di molti altri processi industriali. Come per il PM<sub>10</sub>, queste particelle sono caratterizzate da lunghi tempi di permanenza in atmosfera e, rispetto alle particelle grossolane, sono in grado di penetrare più in profondità nell'albero respiratorio umano. Il particolato PM<sub>2,5</sub> è in parte emesso come tale direttamente dalle sorgenti in atmosfera (PM<sub>2,5</sub> primario) ed è in parte formato attraverso reazioni chimiche fra altre specie inquinanti (PM<sub>2,5</sub> secondario), anzi si può sostenere senza troppa approssimazione che tutto il particolato secondario all'interno del PM<sub>10</sub> (e che ne rappresenta spesso la quota

dominante) sia costituito in realtà da particelle di  $PM_{2,5}$ . L'indicatore particolato  $PM_{2,5}$  si basa sui valori di concentrazione di  $PM_{2,5}$  in atmosfera, misurati nelle stazioni di monitoraggio sul territorio nazionale (ad esempio, le stazioni dell'ARPA) e raccolti dall'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) [2].



**FIGURA 5.**  $PM_{2,5}$  e  $PM_{10}$  – rispettivi valori dei diametri e confronti di questi con il diametro di un capello umano e con il diametro della sabbia fine

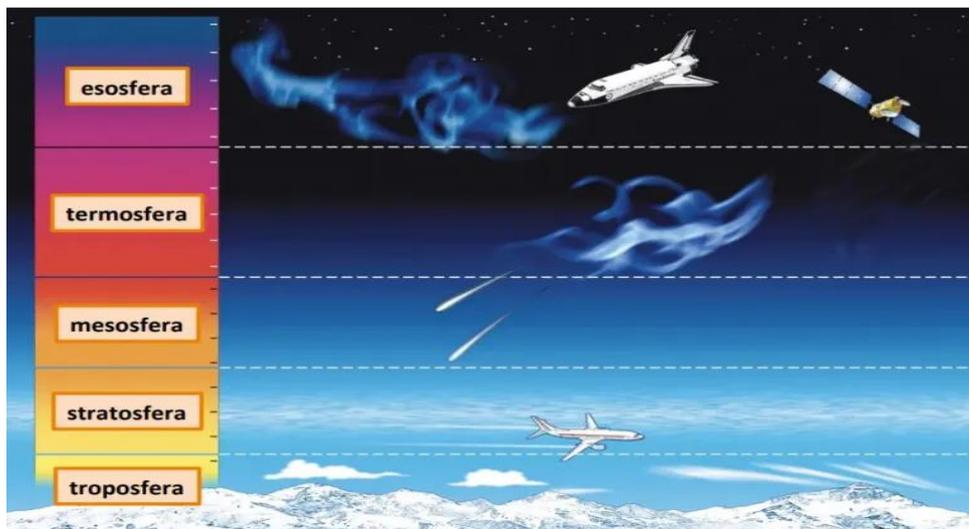
## - OZONO ( $O_3$ )

L'ozono è un gas dall'odore pungente, dotato di un elevato potere ossidante ed è relativamente insolubile in acqua. Si forma nell'atmosfera per effetto di complesse reazioni tra una molecola di ossigeno ( $O_2$ ) ed un atomo di ossigeno (O). La molecola dell'Ozono è dunque costituita da tre atomi di ossigeno ( $O_3$ ).

La presenza dell'ozono nella stratosfera – **FIGURA 6** - (la parte dell'atmosfera terrestre che si trova dai 10 ai 50 Km sul livello del mare) risulta di fondamentale importanza per la vita sulla terra, in quanto fornisce un eccellente schermo in grado di filtrare le radiazioni ultraviolette (UV), che possiedono potenzialità cancerogene.

Negli ultimi decenni alcune sostanze (in particolare i clorofluorocarburi) di cui si è fatto largo impiego nell'industria della refrigerazione, per la produzione di schiume espanse, di spray aerosol, ecc., hanno determinato un assottigliamento della barriera di ozono sulle zone polari (buco dell'ozono).

L'ozono risulta presente anche nella troposfera (**FIGURA 6**), ossia la parte bassa dell'atmosfera vicino alla crosta terrestre, dove si svolge la vita di uomini, animali e vegetali. In questo caso l'ozono è un inquinante, in quanto può avere effetti sulla salute, soprattutto a carico delle vie respiratorie.



**FIGURA 6.** *Suddivisione secondo il gradiente termico verticale che individua quattro strati fondamentali dell'atmosfera*

Si tratta di un inquinante secondario in quanto non proviene da sorgenti dirette di emissione.

L'ozono viene prodotto da una serie di reazioni chimiche, favorite (catalizzate) dalla luce solare, fra sostanze presenti nell'aria ambiente chiamate "precursori", principalmente ossidi di azoto e composti organici volatili (COV).

Gli ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>), sono emessi principalmente dal traffico, dalla produzione di energia, dalla produzione di calore per i processi produttivi e per il riscaldamento degli ambienti.

I composti organici volatili (COV), sono prodotti dal traffico, dall'utilizzo di solventi o di prodotti che li contengono nella verniciatura, la stampa, lo sgrassaggio, la pulizia dei tessuti e delle superfici, ecc...

Le reazioni che portano alla formazione dell'ozono nell'aria ambiente generano anche piccole quantità di altre sostanze ossidanti che formano la miscela chiamata usualmente smog fotochimico, di cui l'ozono è comunque la componente principale.

Queste reazioni, essendo catalizzate dalla luce solare, avvengono prevalentemente nelle ore diurne e nei mesi estivi.

La presenza nell'atmosfera dei "precursori" (NO<sub>x</sub> e COV), indicatori significativi di inquinamento da traffico e da attività produttive, costituisce il "sottofondo" chimico necessario per la formazione dell'ozono, mentre le condizioni di alta pressione e di elevata insolazione costituiscono l'ambiente fisico che favorisce l'innescare delle reazioni di formazione.

Per tali caratteristiche, nei paesi tropicali e nella fascia mediterranea durante i mesi estivi e in condizioni meteorologiche particolari, l'ozono può raggiungere valori medi orari di concentrazione dell'ordine dei 400 - 600  $\mu$  gr/m<sup>3</sup>; tali alte concentrazioni possono permanere su vaste aree per 8-10 ore al giorno e per numerosi giorni. Nelle zone meno esposte al fenomeno le concentrazioni di ozono oscillano intorno ai 40-70  $\mu$  gr/m<sup>3</sup>, come valori medi orari.

Diversamente dagli inquinanti primari, che sono riscontrabili direttamente alle sorgenti che li producono, l'ozono, per effetto dei movimenti e dei rimescolamenti delle masse d'aria che trasportano i "precursori", si può formare a distanza di tempo ed in luoghi anche molto lontani dalle fonti di inquinamento primario, e può a sua volta subire fenomeni di trasporto anche notevoli.

La presenza e la diffusione dell'ozono possono quindi essere condizionati da alcuni parametri così riassumibili:

- a) le concentrazioni in atmosfera dei precursori (NO<sub>x</sub> e COV) determinano la quantità di ozono che si può formare
- b) le condizioni meteorologiche di intenso irraggiamento solare favoriscono (catalizzano) la formazione dell'ozono
- c) l'ozono si forma normalmente a distanza di spazio e di tempo dalle fonti di inquinamento primario ed è in grado di subire a sua volta fenomeni di trasporto anche notevoli
- d) a parità di irraggiamento solare l'ozono aumenta man mano che ci si allontana dal livello del mare (nell'area metropolitana di Torino le maggiori concentrazioni di Ozono si rilevano in collina)
- e) a parità di altezza sul livello del mare e a parità di irraggiamento solare, l'ozono si concentra maggiormente nei paesi tropicali e, di converso, presenta concentrazioni inferiori nelle regioni prossime ai poli
- f) a parità di irraggiamento solare un aumento della temperatura comporta un aumento della formazione di ozono
- g) nei mesi estivi, la velocità del vento influenza la concentrazione di ozono; più il vento cresce di velocità, più si riducono i livelli di ozono

La presenza di elevate concentrazioni di ozono nell'aria ambiente può costituire un problema di sanità pubblica, soprattutto per alcune categorie di soggetti esposti, in quanto il suo elevato potere ossidante è in grado di produrre infiammazioni e danni all'apparato respiratorio più o meno gravi, in funzione della concentrazione cui si è esposti, della durata dell'esposizione e della ventilazione polmonare.

Le infiammazioni ed alterazioni a carico delle vie respiratorie che possono manifestarsi a seguito dell'esposizione ad ozono, determinano una riduzione della funzione polmonare e la comparsa di una iperreattività bronchiale, che si manifesta con sintomi respiratori come tosse, fatica a respirare profondamente, respiro corto.

In conseguenza del decremento della funzionalità respiratoria, possono insorgere inoltre peggioramenti delle patologie respiratorie già in atto come le polmoniti croniche ostruttive, le bronchiti croniche, l'asma, l'enfisema polmonare, così come di preesistenti patologie cardiache quali le ischemie del miocardio. L'esposizione ad ozono può inoltre provocare la diminuzione della resistenza alle infezioni batteriche polmonari.

In generale, si può affermare che gli asmatici sono il gruppo di popolazione maggiormente a rischio per l'esposizione all'azione irritante dell'ozono. Devono prestare attenzione anche altri gruppi di popolazione con preesistenti limitazioni alle funzioni polmonari (polmoniti croniche ostruttive, bronchiti croniche) o con preesistenti patologie cardiache (ischemie del miocardio). I bambini sono da considerarsi soggetti particolarmente sensibili, in quanto l'elevata frequenza del loro ritmo respiratorio, fa sì che vengano inalate quantità maggiori di inquinante in relazione al loro peso corporeo. Altrettanto sensibili sono gli anziani, a causa del normale calo che la funzionalità polmonare subisce con l'età ed alla diminuzione della resistenza alle infezioni batteriche polmonari che può essere provocata in questi individui dall'esposizione ad ozono.

È importante sottolineare che l'attività fisica influisce notevolmente sui potenziali effetti dell'ozono sull'individuo esposto; quindi, se si aumenta l'attività fisica all'aperto, si possono riscontrare, anche sulla popolazione sana, gli effetti descritti.

Si esemplificano di seguito alcune azioni caratteristiche della intensità dell'attività fisica:

- a) lieve attività fisica: camminare,
- b) moderata attività fisica: camminare velocemente,
- c) intensa attività fisica: correre,
- d) attività fisica molto intensa: correre velocemente.

È importante precisare che in ambienti chiusi si riscontrano concentrazioni di ozono molte volte inferiori ai valori contemporaneamente presenti nell'ambiente esterno [3].

#### - **DIOSSIDO DI AZOTO (NO<sub>2</sub>)**

Numerosi sono i rapporti di combinazione dell'azoto con l'ossigeno per formare una serie di ossidi che sono classificati in funzione dello stato di ossidazione dell'azoto.

- NO: ossido di azoto
- N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: triossido di azoto (anidride nitrosa)
- NO<sub>2</sub>: biossido di azoto
- N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>: tetrossido di azoto (ipoazotide)
- N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: pentossido di azoto (anidride nitrica)

Le specie chimiche presenti in aria come inquinanti naturali ed antropogenici e che destano maggiori preoccupazioni in termini di inquinamento atmosferico, sono essenzialmente ossido e biossido di azoto (NO ed NO<sub>2</sub>).

Il termine NO<sub>x</sub> indica la somma del monossido di azoto (NO) e del biossido di azoto (NO<sub>2</sub>). L'ossido di azoto è un inquinante primario che si forma generalmente dai processi di combustione ad alta temperatura; è un gas a tossicità limitata, al contrario del biossido di azoto. L' NO<sub>2</sub> ha un odore forte, pungente, è irritante e di colore giallo-rosso. È responsabile, con altri prodotti, del cosiddetto smog fotochimico, in quanto base per la produzione di una serie di inquinanti secondari pericolosi come l'ozono o l'acido nitrico. Contribuisce per circa un terzo alla formazione delle piogge acide.

Gli ossidi di azoto hanno origine naturale (eruzioni vulcaniche, incendi, processi biologici), ma soprattutto antropica con le combustioni ad alta temperatura, come quelle che avvengono all'interno delle camere di combustione dei motori degli autoveicoli. Altre fonti di ossidi di azoto sono le centrali termoelettriche e in genere tutti gli impianti di combustione di tipo industriale.

L'aumento del traffico veicolare degli ultimi anni ha generato un livello crescente delle concentrazioni di ossidi di azoto, specialmente nelle aree urbane. In caso di inquinamento fortuito da monossido di azoto, la concentrazione decade in 2-5 giorni, ma nel caso di emissioni continue (ad esempio in aree urbane a forte traffico veicolare), si assiste all'attivazione di un ciclo giornaliero che porta alla produzione di inquinanti secondari, quali il biossido di azoto. Il picco si registra nelle ore a traffico più intenso, per poi scendere nelle ore notturne.

Tra gli ossidi di azoto, solo l'NO<sub>2</sub> ha rilevanza tossicologica: provoca irritazione della porzione distale dell'apparato respiratorio - con conseguente alterazione delle funzioni polmonari - bronchiti croniche, asma ed enfisema polmonare.

L' NO<sub>2</sub> ha effetti minori di quelli generati dal biossido di zolfo, anche se può interferire con gli scambi gassosi a livello fogliare, provocando necrosi o clorosi. Gli ossidi di azoto contribuiscono anche alla formazione delle piogge acide e ha conseguenze importanti sugli ecosistemi acquatici e terrestri [4].

#### - **ANIDRIDE SOLFOROSA (SO<sub>2</sub>)**

Gli ossidi di zolfo presenti in atmosfera sono composti principalmente da anidride solforosa o biossido di zolfo (SO<sub>2</sub>) e anidride solforica (SO<sub>3</sub>). La SO<sub>2</sub> è un gas incolore e irritante, è uno degli inquinanti atmosferici tra i più aggressivi e pericolosi.

Il biossido di zolfo (SO<sub>2</sub>) è l'inquinante primario più importante e scaturisce principalmente dall'ossidazione dello zolfo nei processi di combustione di carbone, petrolio e gasolio. Il 90% della produzione è di origine umana ed è per lo più concentrata nei Paesi più industrializzati.

L'ossidazione dell'anidride solforosa produce SO<sub>3</sub> che, reagendo con l'acqua, genera acido solforico, principale responsabile delle piogge acide.

Le emissioni più rilevanti di SO<sub>2</sub> sono originate dalla combustione di carbone fossile e petrolio greggio per il riscaldamento domestico, la produzione industriale e quella di energia da parte delle centrali termoelettriche. Altre fonti sono la lavorazione di materie plastiche, la desolforazione dei gas naturali e l'incenerimento dei rifiuti. Più contenuta invece l'emissione dovuta al traffico veicolare e notevolmente ridotta negli ultimi anni grazie al miglioramento dei combustibili da trazione. Inoltre, la diffusione del metano per il riscaldamento ha ulteriormente ridotto l'emissione degli ossidi di zolfo dovuti al riscaldamento.

L'esposizione prolungata al biossido di zolfo determina effetti a carico dell'apparato respiratorio come tracheiti, bronchiti, polmoniti. In atmosfera l'SO<sub>2</sub> contribuisce all'acidificazione delle precipitazioni, con effetti tossici sui vegetali, acidificazione dei corpi idrici e impatto sulla vita acquatica.

A basse concentrazioni provoca un rallentamento della crescita dei vegetali, mentre a dosi più elevate genera alterazioni fisiologiche tali da portare le piante alla morte. Le precipitazioni acide, infine, possono avere effetti corrosivi su diverse tipologie di materiali [5].

#### - **MONOSSIDO DI CARBONIO (CO)**

Il monossido di carbonio assume particolare rilevanza tra gli inquinanti prodotti dalla combustione. È un gas tossico, incolore, inodore, insapore e non irritante che, senza ventilazione adeguata, può raggiungere concentrazioni elevate. Si produce per combustione incompleta di qualsiasi materiale organico, in presenza di scarso contenuto di ossigeno nell'ambiente. Per le sue caratteristiche può essere inalato in modo subdolo ed impercettibile, fino a raggiungere nell'organismo concentrazioni letali. Il CO presente nell'aria degli ambienti confinati proviene principalmente dal fumo di tabacco e da fonti di combustione non dotate di idonea aspirazione (radiatori portatili a kerosene e a gas, caldaie, scaldabagni, caminetti e stufe a legna o a gas). Il monossido di carbonio può anche provenire dall'esterno quando il locale si trova annesso ad un garage o ad un'autofficina o in prossimità di strade con intenso traffico veicolare.

Nelle abitazioni, in condizioni normali, i livelli sono compresi tra 1,5 e 4,5 mg/m<sup>3</sup>. In presenza di processi di combustione, quali sistemi di riscaldamento e di cottura o di fumo di tabacco, e inadeguata ventilazione, le concentrazioni interne possono superare quelle esterne e raggiungere livelli sino a 60 mg/m<sup>3</sup>. Durante l'inverno nelle abitazioni possono verificarsi concentrazioni superiori a quelle esterne e livelli di inquinamento elevati si riscontrano più frequentemente in edifici vecchi, specie se abitati da famiglie a basso reddito.

Il monossido di carbonio (CO) inalato si lega con l'emoglobina, una proteina presente a livello dei globuli rossi e deputata al trasporto dell'ossigeno, formando la carbossiemoglobina (COHb). Tale legame è molto più stabile (circa 200-300 volte) di quello formato tra emoglobina ed ossigeno, in questo modo il CO impedisce il normale

trasporto dell'ossigeno ai tessuti periferici, determinando effetti tossicologici di diversa entità. Per concentrazioni ambientali di CO inferiori a 5 mg/m<sup>3</sup>, corrispondenti a concentrazioni di COHb inferiori al 3%, non si hanno effetti apprezzabili sulla salute, negli individui sani, mentre in pazienti con affezioni cardiache, anche basse concentrazioni possono provocare una crisi anginosa. A concentrazioni maggiori si verificano cefalea, confusione, disorientamento, capogiri, visione alterata e nausea. Concentrazioni particolarmente elevate possono causare coma e morte per asfissia. La severità delle manifestazioni cliniche da intossicazione da CO dipende dalla sua concentrazione nell'aria inspirata, dalla durata dell'esposizione e dalle condizioni di salute delle persone coinvolte. Particolarmente suscettibili sono gli anziani, le persone con affezioni dell'apparato cardiovascolare e respiratorio, le donne in stato di gravidanza, i neonati ed i bambini in genere. Circa l'80% dei casi di avvelenamento da CO rilevati dai Pronto Soccorso, si verifica tra le mura domestiche. In Italia le statistiche ufficiali più recenti riportano 500-600 morti l'anno, di cui circa i 2/3 per intossicazione volontaria. Tali cifre sicuramente sottostimano la vera entità del fenomeno poiché molti casi di intossicazione, soprattutto quelli accidentali o i casi non mortali, non vengono correttamente diagnosticati e registrati. Molto si è discusso sull'esistenza di un quadro di intossicazione cronica da CO. In alcuni soggetti esposti per lungo tempo all'assorbimento di piccole quantità dell'inquinante, è stata descritta una sintomatologia caratterizzata da astenia, cefalea, vertigini, nevriti, sindromi parkinsoniane ed epilettiche, aritmie, crisi anginose.

La corretta informazione della popolazione generale sulla pericolosità del monossido di carbonio rappresenta il punto centrale nella prevenzione degli effetti dannosi causati da questo pericoloso agente tossico, soprattutto nei periodi a maggiore rischio, come durante i mesi invernali.

- a) Gli impianti di riscaldamento devono essere sottoposti ad una regolare manutenzione da parte di personale specializzato.
- b) I motori degli autoveicoli vanno tenuti spenti negli spazi chiusi.
- c) I sistemi di cottura, progettati per l'utilizzo all'aria aperta non devono essere usati all'interno di spazi chiusi.
- d) L'uso di apparecchiature rivelatrici della presenza di CO può essere incoraggiato, ma non deve essere considerato una alternativa ad una appropriata manutenzione degli impianti.
- e) La classe medica deve essere sensibilizzata in modo particolare al problema, affinché nella diagnosi etiologica non trascuri di valutare il monossido di carbonio come probabile agente eziologico in presenza di quadri clinici compatibili [6].

Ora che abbiamo chiarito i cinque elementi tipi nocivi, è bene capire perché è importante misurare i loro valori. Poiché tutti questi inquinanti non possono essere visti o annusati, è davvero importante effettuare misurazioni. Molte città hanno stazioni che misurano questi elementi nocivi ma non ci sono abbastanza sensori per ogni città per avere informazioni dettagliate per ogni luogo della città stessa per sapere quanto è "buona o cattiva" l'aria che respiriamo.

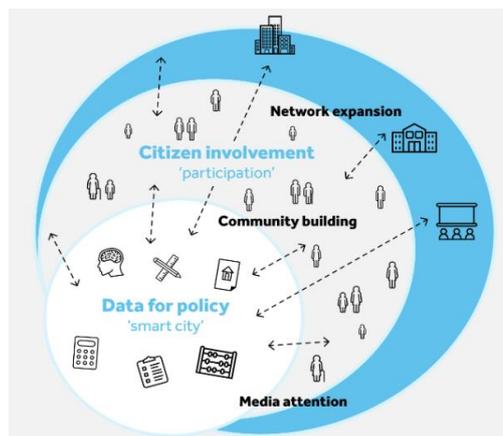
Ma ognuno di noi può aiutare la propria città, sé stesso e gli altri a ridurre e misurare questi inquinanti (e i relativi inquinamenti) e aiutare a pulire l'aria che respiriamo.

Se si vuole agire per un'aria più pulita nel proprio ambiente:

- *Si ha bisogno di iniziative individuali*: si può identificare il nostro potenziale di sostenibilità e contribuire attivamente a migliorare le prospettive per la comunità e il pianeta. In particolare, nel contesto di rendere l'aria più respirabile.
- *Si può promuovere l'azione collettiva*: si deve agire per il cambiamento in collaborazione con gli altri. Collaborazione con altri cittadini, organizzazioni ambientaliste e scienziati.
- *Si può aumentare la propria rappresentanza politica*: si deve navigare nel sistema politico a livello di città o distretto. Si deve identificare chi ha l'autorità politica e la responsabilità per comportamenti o pratiche non sostenibili e richiedere politiche efficaci per una migliore sostenibilità ambientale.

Oltre a misurare, è importante farlo con precisione. A tal proposito si può richiamare la politica basata sull'evidenza (EBP) – **FIGURA 8** - che è un'idea di politica pubblica. Propone che le decisioni politiche dovrebbero essere basate su, o informate da, prove oggettive rigorosamente stabilite. Il contrasto implicito è con il processo decisionale basato su ideologia, "buon senso", aneddoti e intuizioni. Questa prova può essere portata da noi attraverso misurazioni e osservazioni rigorosamente documentate.

La politica basata sull'evidenza con i cittadini si presenta dai dati misurati attraverso le persone, per responsabilizzarle e dare forma a una vera nozione di cittadinanza.



**FIGURA 7.** *Politica basata sull'evidenza (EBP)*

Il progetto Socio-Bee nasce per coinvolgere ogni tipo di cittadino, il quale, per sentirsi a sua volta completamente dentro il progetto, è chiamato a rispondere alle seguenti domande:

- Perché si è qui?
- Qual è il legame con la propria/il proprio zona/quartiere?
- Si hanno bambini che giocano fuori?

- Quali sono gli usi all'aperto nella propria zona per il tempo libero, per lo sport, per andare al lavoro?
- Si è un genitore, un allenatore, un negoziante, uno studente, un bidello, un insegnante, un calciatore, ecc... a cui piace passeggiare?
- Si è curiosi, interessati o preoccupati per l'aria che si respira? Anche per i propri cari?
- Si vorrebbe agire in base a tale preoccupazione?
- Si sa come agire in merito a tale preoccupazione? Si sa cosa fare?

Il diretto interessato deve poi sapere che la Commissione europea vuole ridurre l'inquinamento atmosferico affinché tutti i cittadini europei respirino aria più pulita. Il bando per progetti europei offre denaro per risolvere questo problema complesso e per trovare soluzioni su come farlo al meglio. Socio-Bee ha deciso di accettare la sfida. Con 18 partner provenienti da 7 paesi europei, è stato sviluppato il progetto Socio-Bee, per aiutare i cittadini a farsi carico di questo problema. Sono stati sviluppati dei sensori, un'app e un approccio per consentire a ogni cittadino di effettuare le misurazioni riguardanti l'inquinamento atmosferico nel proprio quartiere per aiutare a risolvere questo problema.



**FIGURA 8.** Consorzio del progetto Socio-Bee: 18 partner provenienti da 7 paesi europei

Abbiamo quindi capito che l'inquinamento atmosferico è una delle principali minacce per gli abitanti di molte città europee (per circa 340 milioni di persone) e per ridurlo è richiesta innovazione tecnologica e un cambiamento comportamentale (sensibilizzazione, cambiamento, modellazione policy). Tali modifiche richiedono la collaborazione tra cittadini, imprese, volontari e decisori.

Il cambiamento comportamentale dovuto alla pandemia "COVID-19" ha mostrato un cambiamento nei modelli di domanda di energia e un calo del 17% delle emissioni di CO<sub>2</sub> a causa del ridotto utilizzo di auto, camion e autobus.



**FIGURA 9.** *Collaborazione tra volontari, imprese, cittadini e decisori*

## 2. STATO DELL'ARTE

### 2.1. LA MISURA DELLA QUALITA' DELL'ARIA

La misura della qualità dell'aria nelle nostre città sta assumendo negli anni sempre più importanza, perché l'inquinamento atmosferico ha effetti negativi sulla nostra salute e ha un notevole impatto sull'ambiente. In Europa l'emissione di molti inquinanti è diminuita fortemente nell'ultimo decennio grazie all'utilizzo di tecnologie più innovative nelle industrie, nella frequenza dell'uso di mezzi di trasporto e nella produzione di energia. Nonostante le attuali innovazioni, le concentrazioni di inquinanti sono ancora alte e il problema della qualità dell'aria persiste. In particolare, il particolato (PM), il diossido di azoto (NO<sub>2</sub>) e l'Ozono (O<sub>3</sub>) sono riconosciuti come i tre inquinanti che maggiormente colpiscono la salute umana.

Esposizioni elevate e a lungo termine a questi inquinanti possono provocare danni al sistema respiratorio, che in condizioni più estreme conducono fino alla morte. È necessario quindi tenere sotto controllo la produzione e la quantità di questi inquinanti, cercando di evitare il raggiungimento di elevati livelli di concentrazione per periodi prolungati. Grazie ai regolamenti europei, sono fornite sempre più indicazioni riguardo la riduzione di emissione di inquinanti e i loro limiti di concentrazione. Nella Direttiva 2008/50/CE, ad esempio, per quanto riguarda il PM<sub>10</sub> il limite giornaliero è di 50 µg/m<sup>3</sup> da non superare più di 35 volte per anno civile [7]. Inoltre, negli ultimi anni sono state fornite direttive riguardo la misurazione dei livelli di inquinamento. Si è ritenuto infatti necessario rafforzare il monitoraggio della qualità dell'aria. A tal proposito si ricorre spesso e volentieri all'uso di un parametro, chiamato indice di qualità dell'aria (AQI): è un numero che definisce lo stato della qualità dell'aria di un determinato luogo e in un determinato momento, prendendo in considerazione contemporaneamente i dati di diversi inquinanti atmosferici. Questo indice serve a comunicare in modo semplice e immediato ai cittadini lo stato dell'inquinamento

atmosferico della loro zona o città, affinché siano a conoscenza della qualità dell'aria che stanno respirando e che respireranno nei giorni a venire.

Ogni Paese ha i suoi standard di qualità dell'aria. In Italia sono definiti dal decreto legislativo 155/2010.

Solitamente gli agenti inquinanti analizzati per l'indice della qualità dell'aria sono:

- **Particolato** (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PTS), il cui limite di riferimento per il PM<sub>10</sub> è di 50 µg/m<sup>3</sup> e per il PM<sub>2.5</sub> di 25 µg/m<sup>3</sup> sulla media giornaliera;
- **Monossido di Carbonio** (CO), il cui limite di riferimento è 10 mg/m<sup>3</sup> (media mobile di 8h);
- **Biossido di Azoto** (NO<sub>2</sub>), il cui valore limite è di 200 µg/m<sup>3</sup> sul massimo orario giornaliero;
- **Ozono** (O<sub>3</sub>), il valore limite è di 120 µg/m<sup>3</sup> sul massimo della media mobile su 8 ore;
- **Biossido di Zolfo** (SO<sub>2</sub>), il cui limite è di 350 µg/m<sup>3</sup> (media oraria).

Il calcolo dell'AQI viene fatto dividendo la misura di una determinata sostanza inquinante per il suo limite di riferimento. Ci sono cinque gradi di giudizio, ciascuno indicato con un colore sulla base della gravità della situazione. Questa classificazione si basa sempre sullo stato del peggiore degli inquinanti presi in considerazione. Ad esempio, se il colore è blu o verde significa che non sono stati superati gli indicatori di legge per nessuno degli inquinanti considerati. Più nello specifico:

- *Azzurro* = qualità dell'aria buona. L'inquinante peggiore ha concentrazioni inferiori alla metà del valore limite.
- *Verde* = qualità dell'aria discreta. L'inquinante peggiore ha concentrazioni fino al valore consentito.
- *Arancione* = qualità dell'aria mediocre. L'inquinante peggiore ha concentrazioni fino a una volta e mezzo il valore limite.
- *Rosso* = qualità dell'aria scadente. L'inquinante peggiore ha concentrazioni fino a due volte il valore limite.
- *Viola* = qualità dell'aria pessima. L'inquinante peggiore ha concentrazioni superiori al doppio del valore limite.

L'indice di qualità dell'aria è uno strumento molto importante sia per quanto riguarda la conoscenza e la consapevolezza dei cittadini per quanto riguarda il luogo in cui vivono e in cui ogni giorno si muovono, sia per consentire alle pubbliche amministrazioni di adottare provvedimenti in giornate particolarmente critiche, ad esempio imponendo un blocco di alcuni veicoli o altri oggetti inquinanti o consigliando alle persone di evitare attività all'aperto per un lungo periodo [8].

Di solito, per misurare i suddetti parametri, si ricorre a stazioni di monitoraggio fisse posizionate in alcuni punti della città (nel nostro caso saranno le stazioni di riferimento dell'ARPAM) – **FIGURA 10 e 11**.



**FIGURA 10 e 11.** Stazioni dell'ARPAM di monitoraggio dell'aria, fisse, situate presso la stazione ferroviaria e il Parco della Cittadella di Ancona

Queste stazioni sono però molto costose ed essendo fisse nei punti in cui sono installate, non offrono un'alta risoluzione spaziale in tutti i punti della città. È necessario quindi cercare nuovi metodi per ottenere un'alta risoluzione spaziale senza, possibilmente, perdere di accuratezza. La soluzione che sempre di più si sta adottando è quella degli LCS e, oltre a questa, la nostra speranza sarà quella di poter introdurre allo stesso tempo anche i sensori del progetto Socio-Bee, sempre per lo stesso fine che non è altro che la misura della qualità dell'aria.

## 2.2. SENSORI LOW-COST PER LA MISURA DELLA QUALITÀ DELL'ARIA

Negli ultimi anni, si sono sempre più diffusi i sensori a basso costo (low-cost-sensor – LCS) per la misura della qualità dell'aria. I LCS stanno cambiando il modo di monitorare e misurare le grandezze in tempo reale. Questi sensori sono, come si può intuire dal nome, a basso costo e possono offrire numerosi vantaggi grazie alle loro piccole dimensioni, al loro livello di compattezza e alla loro facilità di trasporto. Uno degli impieghi dei LCS è la valutazione dell'inquinamento nelle varie zone delle città, grazie alla propria grandezza ridotta e alla capacità di poterli posizionare dove si vuole, come sopra anticipato. Per il nostro scopo verranno utilizzati per effettuare delle misurazioni indoor e in particolare verranno posizionati in un box di plastica chiuso, al cui interno saranno presenti anche il Comfort Air (sensore standard di riferimento) e una fonte di PM<sub>2,5</sub>.

Una buona parte dei sensori low-cost è disponibile e facilmente acquistabile sul mercato elettronico a prezzi molto accessibili, a partire da qualche decina di euro. Tra i dispositivi disponibili, i sensori dedicati alla misura del particolato atmosferico hanno avuto un

grande successo commerciale, legato anche al significativo impatto mediatico di questo inquinante, le cui concentrazioni superano i limiti normativi in alcune delle zone italiane – **FIGURA 12**

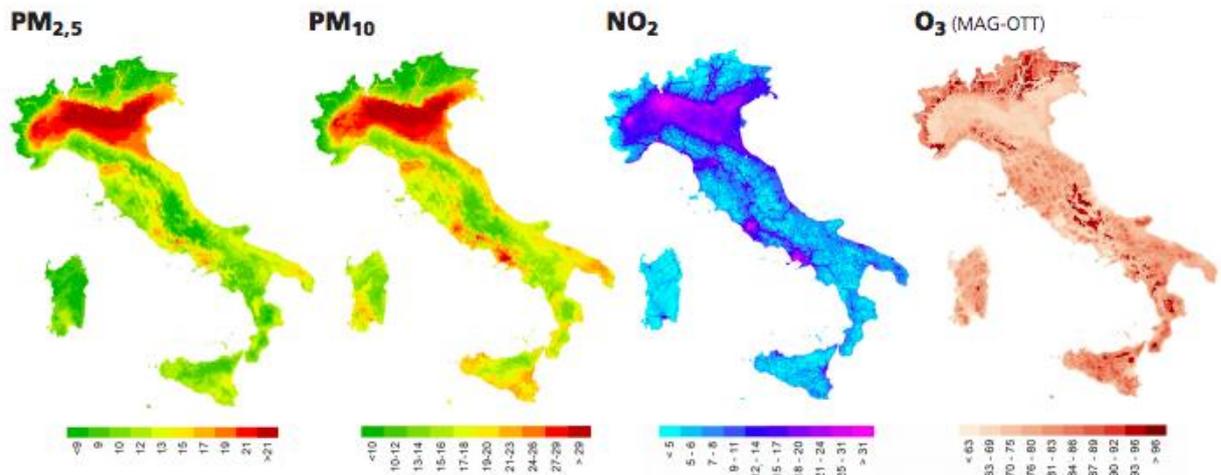


Figura 1. Concentrazioni medie annue (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> e NO<sub>2</sub>, µg/m<sup>3</sup>) e dei mesi maggio-ottobre (O<sub>3</sub>, µg/m<sup>3</sup>), anno 2018.  
 Figure 1. Annual mean concentrations (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, and NO<sub>2</sub>, µg/m<sup>3</sup>) and mean of the months May-October (O<sub>3</sub>, µg/m<sup>3</sup>), year 2018.

**FIGURA 12.** Concentrazioni medie annue di PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub> e NO<sub>2</sub> [µg/m<sup>3</sup>] e dei mesi maggio-ottobre di O<sub>3</sub> [µg/m<sup>3</sup>], anno 2018

Altri aspetti importanti dei LCS sono la possibilità di realizzare stazioni di monitoraggio mobili che misurano il livello di inquinanti, offrendo una elevata risoluzione spaziale e temporale, e di poter registrare un numero molto elevato di dati rispetto alle stazioni fisse - basti pensare che le stazioni fisse dell'ARPAM hanno una frequenza di campionamento di un'ora, mentre i sensori low-cost che verranno analizzati permettono di visionare dati ogni cinque secondi.

Invece, uno svantaggio degli LCS è l'elevata incertezza, influenzata dalle condizioni ambientali che li circondano, dato che è quel parametro associato al risultato di una misura caratterizzante la dispersione dei valori che possono essere ragionevolmente attribuiti al misurando; non è nient'altro che il grado di indeterminazione da associare alla misura effettuata. Avere un'incertezza molto elevata rende i sensori low-cost poco attendibili, soprattutto quelli che costano pochi euro. Essi devono quindi essere calibrati per poter mantenere delle performance accettabili.

Poi, gli LCS possono avere problemi di *cross sensitivity*, ovvero un sensore che misura una tipologia di gas potrebbe essere influenzato dalla presenza di un altro gas, fornendo misurazioni sbagliate. Proprio per questo motivo richiedono calibrazioni più frequenti [2].

Dunque, nonostante la semplicità e il basso costo che hanno gli LCS rispetto alle stazioni fisse, essi avranno nella maggior parte dei casi incertezze molto grandi che li renderanno poco adatti per ottenere misure molto accurate e precise.

L'accuratezza è il grado di approssimazione della quantità misurata al valore atteso mentre la precisione indica il grado di scostamento dei risultati delle misure tra loro.

### 3. MATERIALI E METODI

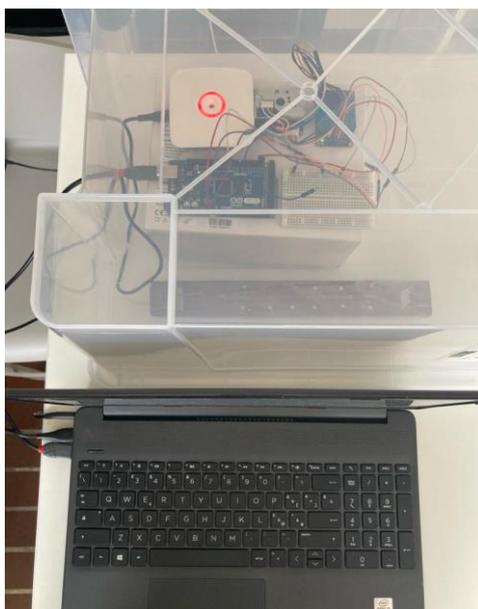
#### 3.1. MISURE INDOOR DI QUALITA' DELL'ARIA

Negli ultimi anni si sono diffusi e poi evoluti diversi tipi di sensori a basso costo per la determinazione di inquinanti atmosferici, pur mantenendo dei risultati diversi rispetto alle stazioni fisse di riferimento. Nel vasto mercato dei LCS troviamo una grande varietà di sensori che a loro volta misurano numerosi parametri come  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ , gas, temperatura e umidità relativa.

In questa tesi, per le misurazioni indoor si confronteranno sensori che misurano stessi parametri, per poi poter calcolare l'incertezza di misura e valutarne l'utilizzo. I LCS che verranno analizzati misurano  $PM_{2.5}$  e  $PM_{10}$ . Si chiamano rispettivamente PMSA003I ( $PM_{2.5}$  e  $PM_{10}$ ) e GP2Y101AUOF - Dust Sensor ( $PM_{10}$ ); costano 56,65€ e 7,80€. Invece, come riferimento standard misurante gli stessi parametri si ha il Comfort Air (CA).

Ogni sensore LCS viene collegato singolarmente all'Arduino. Arduino è una piccola scheda elettronica equipaggiata di un microcontrollore centrale (il microcontrollore è il cervello del sistema) e di componenti elettronici così da rendere più semplice il collegamento con dispositivi esterni di vario tipo.

Una volta compiuto il collegamento di PMSA003I e GP2Y101AUOF (Dust Sensor) all'Arduino, viene collegata la scheda al computer e conseguentemente si ricevono sul pc i dati che misurano i sensori.



**FIGURA 13.** In figura viene illustrata dall'alto la disposizione dei LCS e del CA – entrambi a uno stesso livello di altezza – durante la misurazione indoor all'interno di un box di plastica e le loro relative connessioni esterne a un PC

Il Comfort Air (CA), a differenza dei LCS, può essere alimentato esternamente collegandolo a una presa di corrente oppure in alternativa si può sempre collegare al PC.

Gli ultimi due fondamentali componenti per il nostro scopo sono l'incenso e un box di plastica. In questo studio, abbiamo usato la combustione dell'incenso per la produzione di  $PM_{2,5}$  all'interno di un box di plastica - dimensioni 56cm x 38 cm x 26,5 cm.

L'inquinamento atmosferico domestico è un noto fattore di rischio per la salute umana. L'OMS ha riferito che il 7,7% della mortalità globale (3,8 milioni di morti) è stato attribuito all'inquinamento atmosferico domestico. La ricerca, finora, ha identificato come la principale fonte di inquinamento atmosferico domestico l'uso di combustibili solidi, nonché le fonti di inquinamento dell'aria interna dovute al fumo e alla pulizia domestica. Tuttavia, l'effetto della combustione dell'incenso nelle case residenziali ha ricevuto poca attenzione in letteratura.

Nel nostro caso utilizzeremo proprio i bastoncini di incenso. La combustione dell'incenso produce particolato fine e ultrafine, composti organici volatili, altri composti gassosi e metalli pesanti. Tra questi inquinanti, il particolato emesso dalla combustione dell'incenso è preoccupante per la salute, come afferma anche l'articolo [9].

La ricerca ha dimostrato che l'esposizione al fumo di incenso potrebbe avere effetti dannosi sulla salute, come tumori, asma, dermatiti, mutagenesi ed effetti genotossici. Si è dimostrato che l'asma negli adolescenti è associata anche all'eventuale frequente combustione di incenso e che i bambini esposti a essa che vivono in una casa umida sono a maggior rischio di asma o allergia. Inoltre, l'esposizione quotidiana alla combustione di incenso è associata a una ridotta funzionalità polmonare adolescenziale [10].



**FIGURA 14.** *Incenso che si consuma bruciando ed emanando fumo*

Per analizzare la quantità esatta di  $PM_{2,5}$  in un determinato istante di tempo all'interno di un ambiente indoor, si è preso come tale un box di plastica di note dimensioni al cui interno è stato posizionato il bastoncino di incenso, oltre ai sensori e all'Arduino sopra citati.

Il box di plastica è stato poi chiuso lungo ciascuno spigolo e ad ogni estremità oltre che essere forato al centro di una faccia laterale per poter permettere la connessione del CA a un alimentatore esterno e la connessione dell'Arduino Mega2560 al computer.

### 3.1.1. SET-UP SPERIMENTALE

#### - PMSA003I: LCS PER LA MISURA DI PM<sub>2,5</sub> E PM<sub>10</sub>

Il PMSA003I (**FIGURA 15**) consiste, come già accennato, in un sensore della qualità dell'aria. Esso si presenta con un formato compatto e ha un'interfaccia I2C per cui può essere usato con i computer Linux, quale ad esempio Raspberry Pi o anche con Arduino. Il sensore utilizza la diffusione laser per irradiare le particelle sospese nell'aria, dopo di che esso raccoglie la luce diffusa per ottenere la curva dei cambiamenti della luce diffusa nel tempo. Il diametro delle particelle equivalenti e il numero delle particelle con diametri differenti per unità di volume vengono quindi calcolati dal microprocessore.

Lo stream dei dati I2C si aggiorna una volta al minuto fornendo:

- La concentrazione di PM<sub>2,5</sub> e PM<sub>10</sub> sia in unità standard che ambientali
- Particolato per 0.1L di aria, classificato in contenitori di dimensioni 0.3 µm, 0.5 µm, 1.0 µm, 2.5 µm, 5.0 µm e 10 µm

Fornisce anche una metodologia che serve a controllare l'integrità di un dato o di un messaggio che potrebbe subire delle modifiche durante la sua trasmissione, in formato binario. La scheda breakout presenta un circuito mini boost da 5V: è quindi possibile alimentarlo da 3.3 a 5V [11]. Il costo del sensore è di € 56,65. Le specifiche del sensore sono riportate nella seguente tabella (**TABELLA 1**) [12].



**FIGURA 15.** PMSA003I

<b>SPECIFICA</b>	<b>VALORE</b>
<i>Risoluzione delle particelle</i>	1 µg/m <sup>3</sup>
<i>Volume standard delle particelle</i>	0,1 L
<i>Tempo di risposta singola</i>	< 1 sec
<i>Tempo di risposta totale</i>	≤ 10 sec
<i>Tipo di alimentazione</i>	5,0 V: min 4,5 V / max 5,5 V
<i>Range di temperatura di funzionamento</i>	-10 °C / 60 °C
<i>Range di umidità di funzionamento</i>	0 % / 99 %

<i>Range di temperatura di conservazione</i>	-40 °C / 80 °C
--	----------------

**TABELLA 1.** Specifiche del sensore PMSA003I

**- GP2Y1010AU0F (Dust Sensor): LCS PER LA MISURA DI PM<sub>10</sub>**

Il sensore GP2Y1010AU0F (**FIGURA 16**) è un sensore di polvere con sistema di rilevamento ottico. Questo dispositivo presenta un diodo emettitore a infrarossi (IRED) e un fototransistor disposti diagonalmente, grazie ai quali rileva la luce riflessa della polvere nell'aria. È efficace soprattutto nel rilevare particelle molto fini, come il fumo di sigaretta. Può anche distinguere il fumo dalla polvere di casa grazie ai pattern di impulso della tensione di uscita. Il prezzo di questo sensore è pari a 7,80€ [13].

**CARATTERISTICHE**

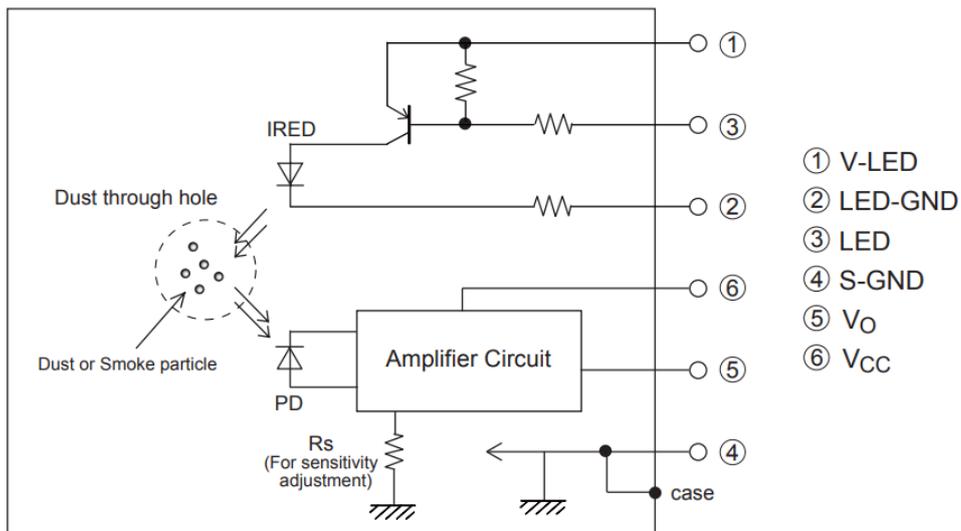
- C1.** Pacchetto compatto e sottile (46,0 × 30,0 × 17,6 mm)
- C2.** Basso consumo di corrente (Icc: MAX. 20 mA)
- C3.** La presenza di polvere può essere rilevata dalla fotometria di un solo impulso
- C4.** Consentono di distinguere il fumo dalla polvere domestica
- C5.** Senza piombo e conforme alla direttiva RoHS

**APPLICAZIONI**

- A1.** Rileva la polvere nell'aria.
- A2.** Funge da purificatore d'aria, condizionatore d'aria e può monitorare l'aria



**FIGURA 16.** GP2Y1010AU0F (Dust Sensor)



**FIGURA 17.** Schema interno del GP2Y101AU0F (Dust Sensor)

Le specifiche di questo sensore sono riportate nella tabella di seguito [14].

<b>SPECIFICA</b>	<b>VALORE</b>
<b>Temperatura di lavoro massima</b>	65° C
<b>Temperatura di lavoro minima</b>	-10° C
<b>Tensione di alimentazione di lavoro</b>	5 V
<b>Tensione in uscita</b>	0,6 V
<b>Sensibilità</b>	0.5 V/(100 µg/m <sup>3</sup> )
<b>Tensione di alimentazione massima</b>	5,5 V
<b>Tensione di alimentazione minima</b>	4,5 V
<b>Massa</b>	17 g

**TABELLA 2.** Specifiche del sensore GP2Y101AU0F (Dust Sensor)

## - ARDUINO MEGA 2560

Nel nostro caso specifico abbiamo utilizzato l'Arduino MEGA2560 (**FIGURA 18**), ovvero una scheda basata sul microcontrollore ATmega2560 e dotata di 54 pin di input/output digitali (14 dei quali possono essere usati come segnali PWM), 16 input analogici, 4 UART, un quarzo a 16MHz, un connettore USB, un jack per l'alimentazione, un connettore per la programmazione ICSP ed un pulsantino per il reset della scheda. La scheda inoltre fornisce tutto ciò che è necessario per supportare il funzionamento del microcontrollore [15]. Vedremo anche come i due sensori low-cost sono collegati ad una singola scheda di Arduino.

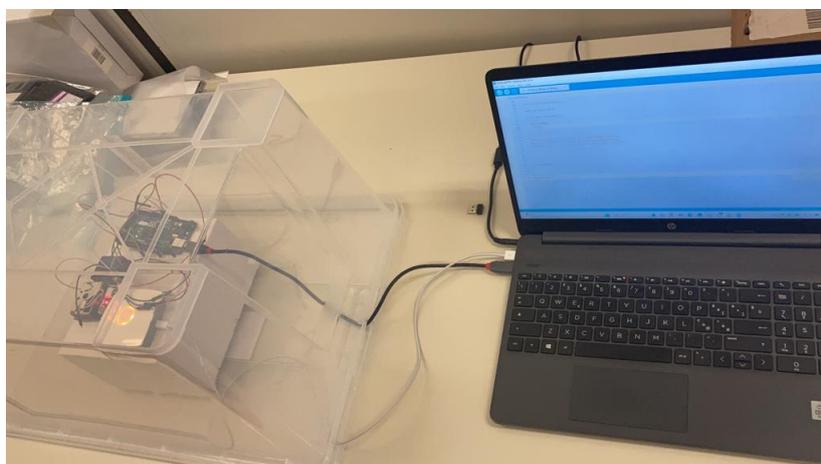


**FIGURA 18.** Arduino Mega2560

## **- METODI DI COLLEGAMENTO DEI SENSORI PMSA003I E GP2Y101AUOF (Dust Sensor) CON ARDUINO MEGA2560**

In questa sezione verrà illustrato come ognuno dei due sensori viene collegato ad Arduino singolarmente ma anche come entrambi vengono collegati contemporaneamente alla singola scheda di Arduino Mega2560. Per il nostro scopo, siamo ovviamente interessati al secondo caso. Ricordiamo poi che la connessione con Arduino viene effettuata attraverso l'uso dei jumper.

Una volta compiuto il collegamento e collegata la scheda al computer, si ricevono sul pc i dati che misurano i sensori (**FIGURA 19**)

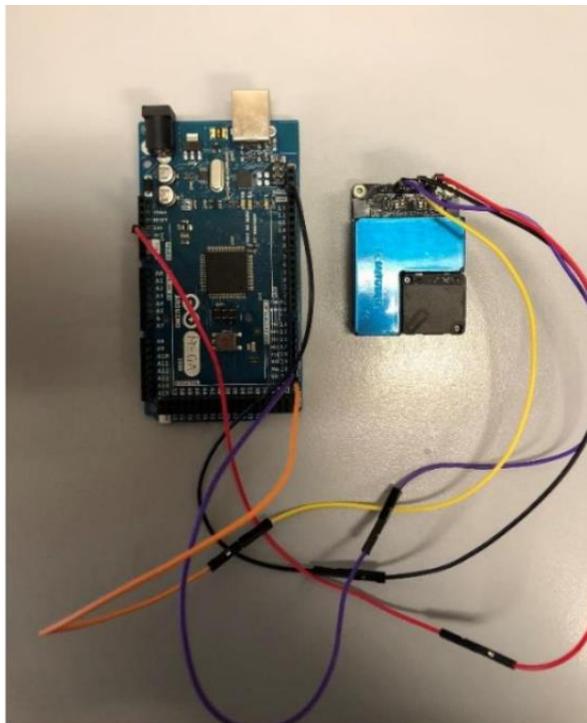


**FIGURA 19.** PC che riceve i dati misurati dai sensori durante una prova di misurazione indoor

- **SINGOLO COLLEGAMENTO DEL SENSORE PMSA003I ALL'ARDUINO MEGA2560**

L'utilizzo del PMSA300I con Arduino è una semplice questione di collegarlo al microcontrollore compatibile con Arduino, installare la libreria "Adafruit PM25AQI" ed eseguire sul PC il corrispettivo codice (sketch). Il collegamento di questo sensore con Arduino Mega2560 avviene nella seguente modalità (**FIGURA 20**) [16]:

1. Collegare **PMSA300I VCC (filo rosso)** ad **Arduino 5V** se si utilizza una scheda Arduino 5V (Uno, Mega2560, ecc.). Se la scheda è 3V, connetterlo invece a quella
2. Collegare **PMSA300I GND (filo nero)** ad **Arduino GND**
3. Collegare **PMSA300I SCL (filo giallo)** ad **Arduino SCL**
4. Collegare **PMSA300I SDA (filo blu)** ad **Arduino SDA**

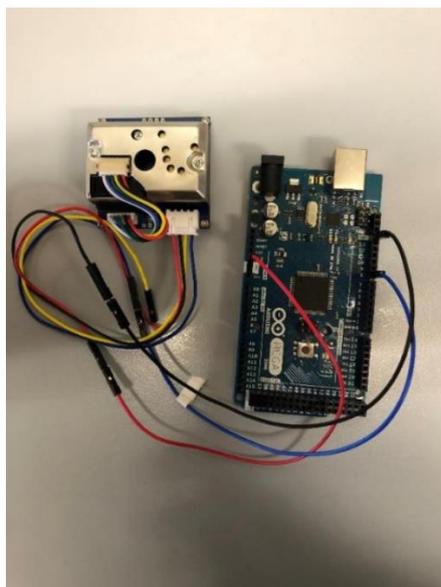


**FIGURA 20.** Singolo collegamento tra PMSA003I e ArduinoMega2560

- **SINGOLO COLLEGAMENTO DEL SENSORE GP2Y101AUOF (Dust Sensor) ALL'ARDUINO MEGA2560**

Il collegamento di questo sensore con Arduino Mega2560 avviene nella seguente maniera (**FIGURA 21**) [17]:

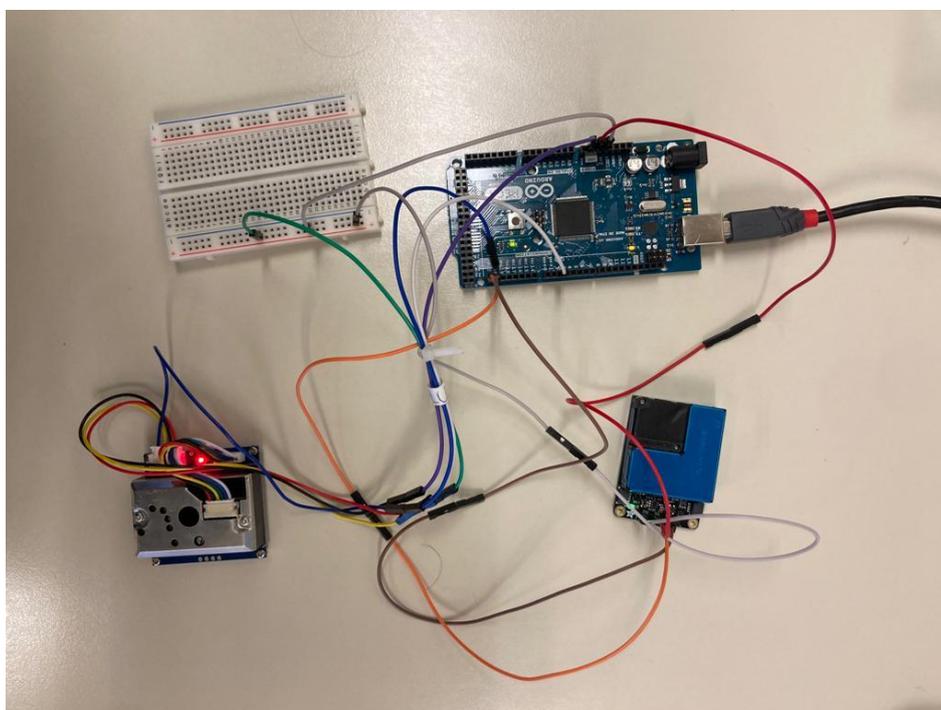
1. Collegare **GP2Y101AUOF GND** ad **Arduino GND**
2. Collegare **GP2Y101AUOF VCC** ad **Arduino 5V** se si utilizza una scheda Arduino 5V (Uno, Mega2560, ecc.). Se la scheda è 3V, connetterlo invece a quella
3. Collegare **GP2Y101AUOF AOUT** ad **Arduino PWM7**



**FIGURA 21.** Singolo collegamento tra GP2Y101AU0F (Dust Sensor) e ArduinoMega2560

- **COLLEGAMENTO CONTEMPORANEO DI GP2Y101AU0F (Dust Sensor) E DI PMSA003I ALL'ARDUINO MEGA2560**

Ecco come i 5 sensori sono stati collegati contemporaneamente ad Arduino (**FIGURA 22**). Per il voltaggio è stata utilizzata un board, in quanto Arduino non possiede più di un voltaggio da 3,3 V.



**FIGURA 22.** Contemporaneo collegamento di GP2Y101AU0F (Dust Sensor) e di PMSA003I all'Arduino Mega2560

## - COMFORT AIR

L'obiettivo di questa tesi è quello calcolare l'incertezza di misura dei due sensori LCS presi in considerazione. Per compiere ciò essi sono stati posti accanto a quello di riferimento, chiamato Comfort Air (CA) – **FIGURA 23**, e sono stati confrontati sulla base dell'analisi dei dati misurati. Il riferimento CA per le misure indoor è un prototipo già calibrato, utilizzato per fornire misure accurate e quindi con molta affidabilità. Il Comfort Air misura  $PM_{2.5}$  e  $PM_{10}$ . Ha una frequenza di campionamento pari a 1 minuto, a differenza dei due sensori LCS che ne hanno una di 5 secondi.



**FIGURA 23.** *Comfort Air in modalità ON, collegato a una presa di corrente. Il colore rosso in figura indica una scarsa qualità dell'aria*

## - BOX DI PLASTICA

Per il nostro scopo abbiamo utilizzato un box di plastica (**FIGURA 24**) come ambiente chiuso per effettuare la misurazione indoor. Ha dimensioni pari a 56cm x 38 cm x 26,5 cm ed è stato chiuso in ogni spigolo e in ogni vertice per isolarlo dall'ambiente esterno. È stato solo forato centralmente in una delle sue facce laterali per consentire la connessione dell'Arduino e del Comfort Air al PC.



**FIGURA 24.** Box di plastica (56cm x 38 cm x 26,5 cm)

### - **INCENSO**

Per il test effettuato e per l'obiettivo prefissato è stato utilizzato un bastoncino di incenso, anch'esso ovviamente all'interno del box di plastica. Questa scelta è dovuta al fatto che, quando brucia, l'incenso funge da fonte di PM<sub>2,5</sub>, come afferma l'articolo [9].

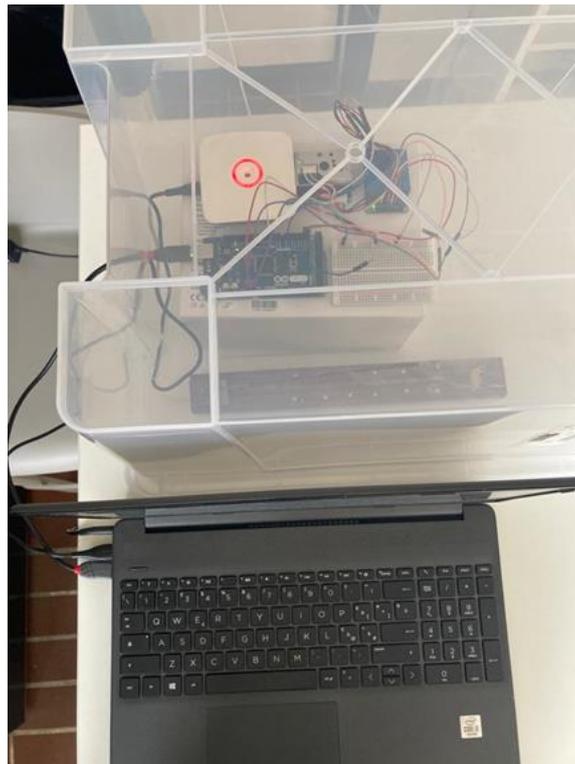


**FIGURA 25.** Incenso utilizzato per il test

### 3.1.2. PROTOCOLLO DI MISURA

Il particolato  $PM_{2,5}$  è un inquinante atmosferico e una sua possibile fonte è la combustione di un bastoncino di incenso. Il test che abbiamo attuato in laboratorio prende spunto dalla prova eseguita nell'articolo [18].

In questa tesi è stata fatta una prova dinamica, effettuata all'interno del box di plastica sopra citato. Al suo interno abbiamo messo un rilievo costituito da un parallelepipedo rettangolo in cartone, sopra al quale sono stati posizionati i due sensori LCS, il Comfort Air e l'Arduino Mega2560, per far sì che i tre sensori misurino a una stessa quota di altezza. Il bastoncino di incenso, invece, è stato posizionato alla base del box e si estende verso l'alto in direzione  $45^\circ$  rispetto all'asse orizzontale (costituito dal piano d'appoggio del box). Il box è stato chiuso in ogni suo spigolo e in ogni suo vertice per fare in modo di isolarlo dall'ambiente esterno, ad eccezione di un solo foro realizzato al centro di una delle facce laterali del box stesso per garantire la connessione dell'Arduino (a cui sono collegati i due sensori LCS) e del CA al PC. Il foro su cui passano le connessioni è circolare e fatto in modo da minimizzare il più possibile le perdite di  $PM_{2,5}$  (**FIGURA 26**).



**FIGURA 26.** Test (misurazione indoor) durante il suo svolgimento

La durata del test è pari a 30 minuti. La prova viene avviata a bastoncino di incenso in stato di quiete (non bruciato) e tale stato permane per i primi tre minuti. Passato questo tempo, ecco che il box viene aperto, l'incenso viene bruciato e il box viene richiuso. Tutto ciò viene attuato nel più breve tempo possibile, per far sì che l'ambiente interno non si confonda con l'ambiente esterno. Una volta che il box viene richiuso, l'incenso emana del fumo e quindi nient'altro che  $PM_{2,5}$ . Da questo punto in avanti, il tempo considerato per il nostro test è

pari a ventisette minuti. L'acquisizione dei dati, quindi la rilevazione di PM<sub>2,5</sub>, è stata fatta nello specifico confrontando CA e PMSA003I.

Lo scopo del test è confrontare le misure di PM<sub>2,5</sub> effettuate dal sensore PMSA003I e dal CA, calcolando quindi l'incertezza di misura che il LCS ha rispetto al sensore di riferimento.

### 3.1.3. ANALISI DATI

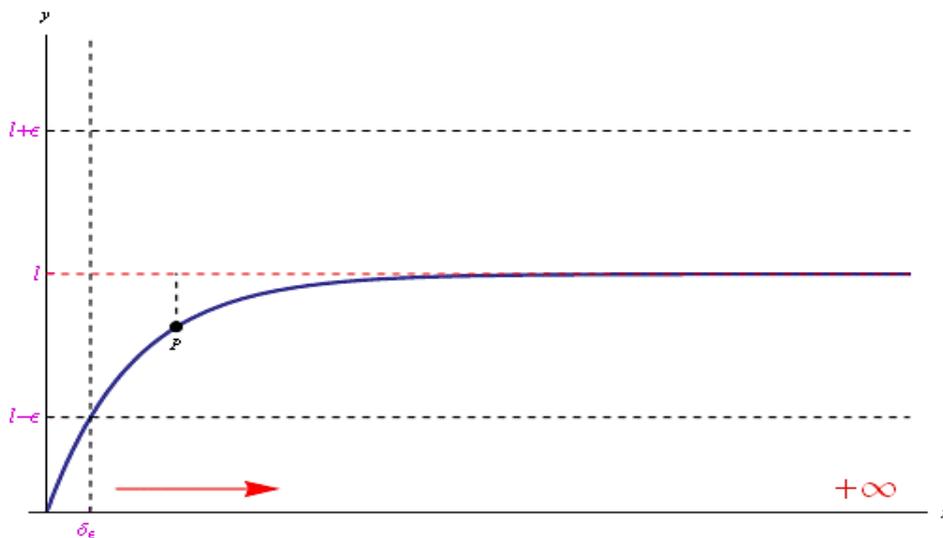
Per l'analisi dei dati si è fatto riferimento a [18]. Viene considerata la seguente equazione

$$C_{in} = \frac{E_R}{Vk_{obs}} (1 - e^{-k_{obs}t})$$

dove

- $C_{in}$  = concentrazione di massa del particolato nel box [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]
- $E_R$  = tasso di rilascio del particolato [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]
- $V$  = volume del box pulito [ $\text{m}^3$ ]
- $k_{obs}$  = tasso di rimozione [volte/secondo]
- $t$  = tempo [secondi]

Con l'ipotesi che non ci siano perdite di PM<sub>2,5</sub> dall'interno all'esterno della scatola e quindi che si abbia un andamento esponenziale con il relativo asintoto orizzontale (**FIGURA 27**)



**FIGURA 27.** Andamento tipico di un esponenziale con asintoto orizzontale pari a "l"

Poi per l'analisi dei dati di questa misurazione indoor abbiamo utilizzato i seguenti parametri:

- **DEVIAZIONE STANDARD**

È un indice dell'imprecisione della misura e in particolare rappresenta la migliore misura della dispersione. È definita in termini dei quadrati delle deviazioni dalla media:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n e_i^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

dove

- **n**: numero di misurazioni effettuate
- **e<sub>i</sub>**: residuo (deviazione dell'i-esima misura x<sub>i</sub> dal valore medio  $\bar{x}$ )
- **x<sub>i</sub>**: i-esima misura
- **$\bar{x}$** : valore medio

- **RESIDUI**

I residui sono la differenza tra i valori osservati e stimati in un'analisi di regressione. I valori osservati che si trovano al di sopra della curva di regressione hanno un valore residuo positivo e i valori osservati che scendono al di sotto della curva di regressione hanno un valore residuo negativo

- **METODO DEI MINIMI QUADRATI**

L'analisi di regressione serve a determinare la curva interpolante che meglio approssima una distribuzione di coppie di dati. Il metodo ai minimi quadrati è stato formulato dal Legendre e afferma che il valore più probabile di una quantità misurata è tale che la somma dei quadrati delle deviazioni delle misure da questo valore è minimo.

Si supponga di aver acquisito N valori delle due variabili di ingresso (P<sub>i</sub>) e di uscita (x<sub>o</sub>) e che esse siano legate dalla seguente relazione lineare

$$x_o = mP_i + b$$

Per la generica coppia (P<sub>ik</sub>, x<sub>ok</sub>), la deviazione del valore di x<sub>ok</sub> calcolato usando la retta (mP<sub>ik</sub> + b) e il valore misurato sarà

$$d_k = mP_{ik} + b - x_{ok}$$

Il valore più probabile di  $m$  e  $b$ , ovvero quelli che permettano di individuare la retta che meglio approssima la distribuzione delle coppie di punti sperimentali, si ottengono minimizzando la quantità

$$\sum_{i=1}^N d_k^2 = \sum_{i=1}^N (mP_{ik} + b - x_{ok})^2$$

Per minimizzare tale funzione la sua derivata rispetto alle due incognite  $m$  e  $b$  deve essere uguagliata a 0

$$\frac{\partial}{\partial m} \sum_{k=1}^N d_k^2 = 0 \quad e \quad \frac{\partial}{\partial b} \sum_{k=1}^N d_k^2 = 0$$

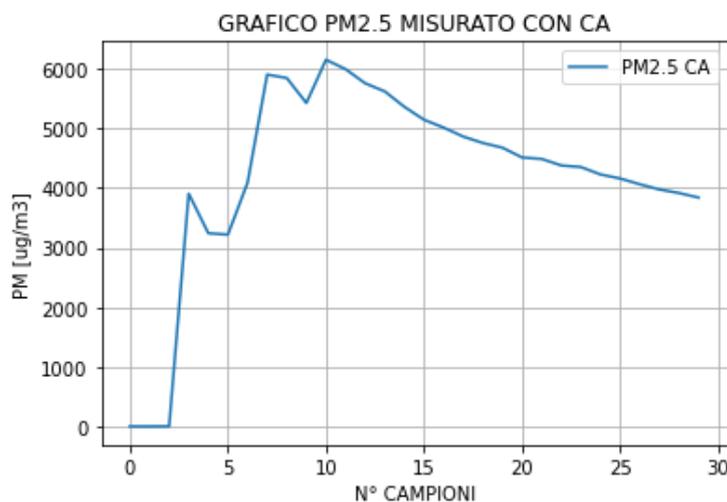
Si ottengono così due equazioni che risolte forniscono i valori di  $m$  e  $b$

#### - INCERTEZZA DI MISURA

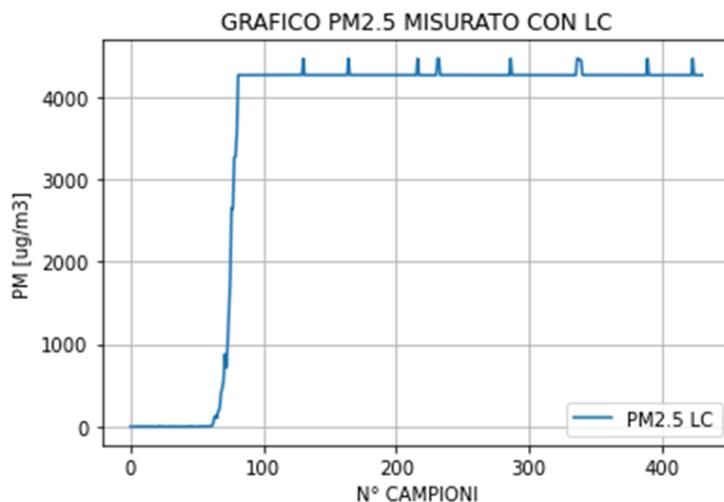
Bisogna sapere che esiste un grado di indeterminazione da associare alla misura. L'incertezza è un parametro associato al risultato di una misura che caratterizza la dispersione dei valori che possono essere ragionevolmente attribuiti al misurando. Rappresenta la stima eseguita secondo procedimenti convenzionali del nostro livello di non conoscenza del misurando.

### 3.1.4. RISULTATI

Come già detto, i risultati sono stati elaborati sulla base del confronto effettuato considerando i valori di  $PM_{2.5}$ , rispettivamente per il Comfort Air e per il PMSA003I. Gli andamenti di  $PM_{2.5}$  misurati durante la prova, ricordando che il CA ha una frequenza di campionamento pari a 1 minuto ed il LCS di 5 secondi, sono riportati nelle **FIGURE 28 e 29**

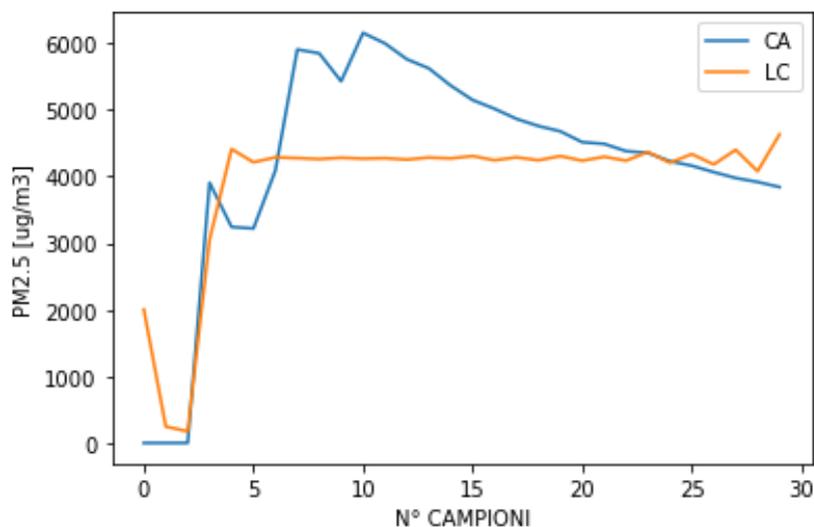


**FIGURA 28.** Andamento di  $PM_{2.5}$  misurato con il Comfort Air



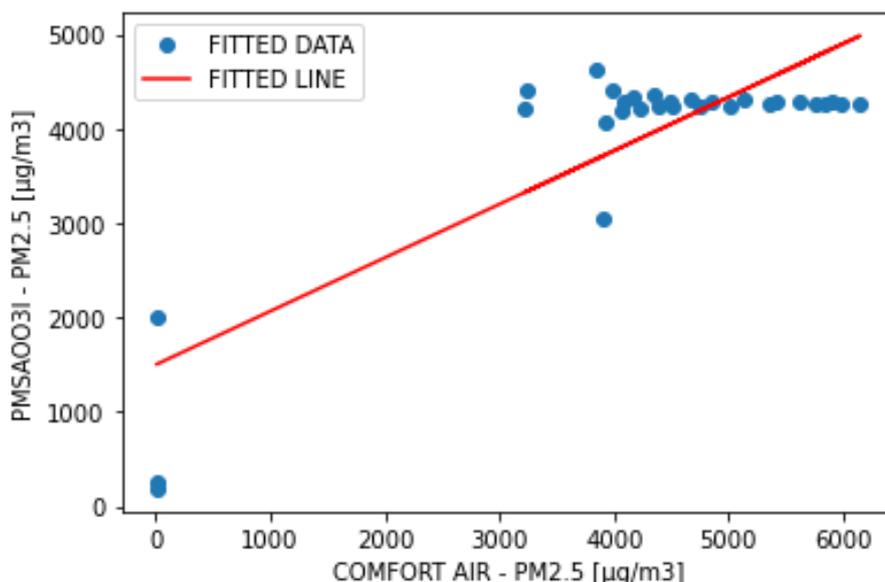
**FIGURA 29.** Andamento di PM<sub>2.5</sub> misurato con il PMSA003I (LCS)

Per poter confrontare i valori misurati dai due sensori è necessario stabilire una frequenza di campionamento uguale per entrambi. Nel caso della prova, la misura effettuata con il LCS è stata ricampionata in modo da avere una frequenza di campionamento uguale a quella del CA, cioè un valore misurato al minuto, in modo da ottenere un grafico di 30 misurazioni per ciascun sensore (**FIGURA 30**)

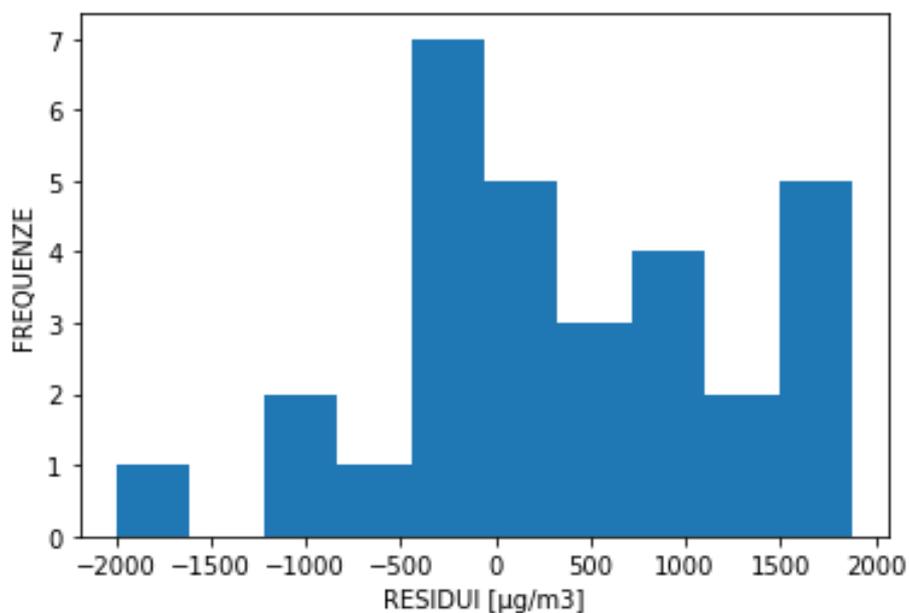


**FIGURA 30.** Andamento di PM<sub>2.5</sub> a confronto: il LCS vede modificare la sua frequenza di campionamento a 1 minuto

Sono stati poi calcolati la retta di regressione lineare (riportata in **FIGURA 31**) e i residui (riportati in **FIGURA 32**)



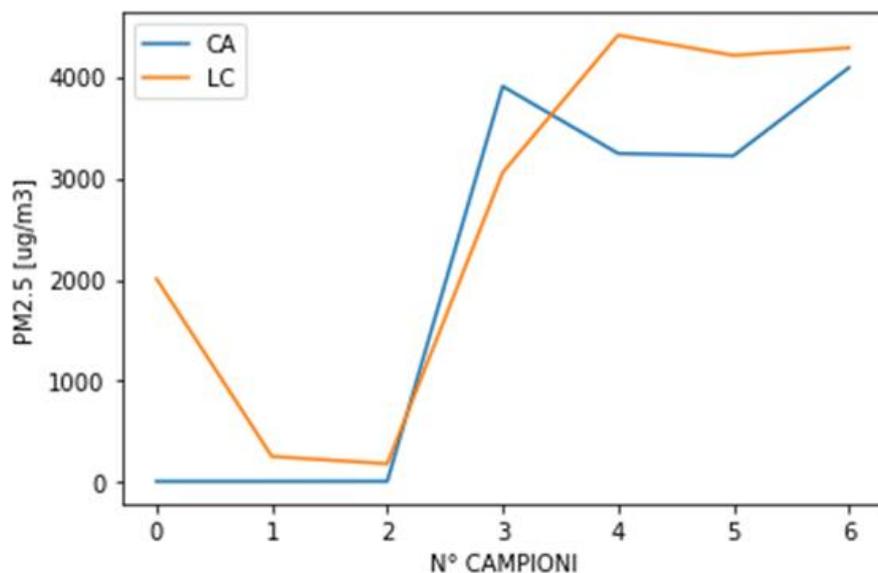
**FIGURA 31.** Retta di regressione lineare della misurazione indoor



**FIGURA 32.** Istogramma dei residui per la misurazione indoor

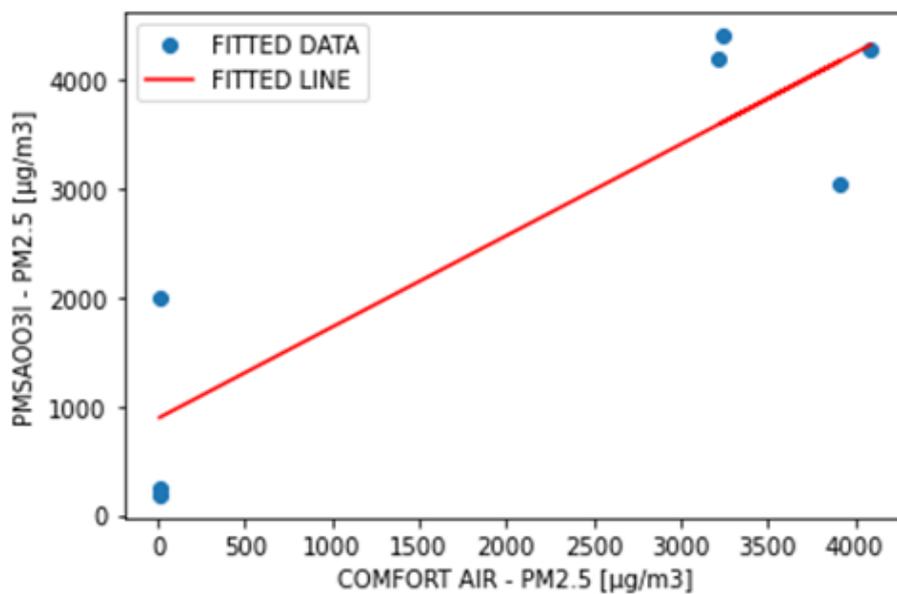
Iterando la prova, in vari tentativi successivi, si è dimostrato che l'andamento del  $PM_{2.5}$  misurato con il LCS rimane pressoché simile a quello visto in precedenza (**FIGURA 29**). Diventa chiaro pensare che il LCS giunge a una condizione di saturazione. Quindi, se si vuole calibrare questo sensore è bene farlo tenendo presente questo dato e quindi calibrandolo fino al punto in cui comincia a saturare.

Il grafico si suddividerà in due parti: una che arriva fino al punto in cui il sensore satura (**FIGURA 33**), l'altra che parte dalla saturazione del sensore stesso.

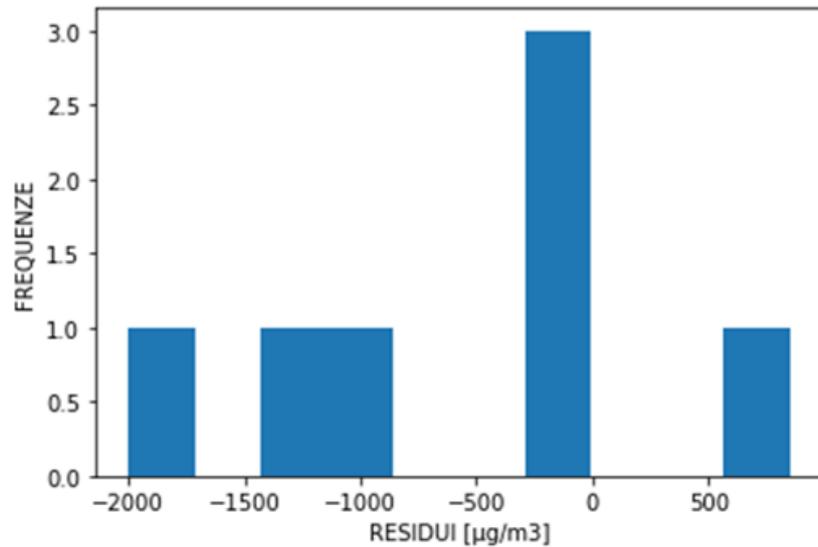


**FIGURA 33.** Andamento di  $PM_{2.5}$  rilevato dai due sensori a confronto prima che il LCS arrivi a saturazione

Arrivati a questo punto, abbiamo ricalcolato la retta di regressione lineare (**FIGURA 34**) e i residui (**FIGURA 35**).



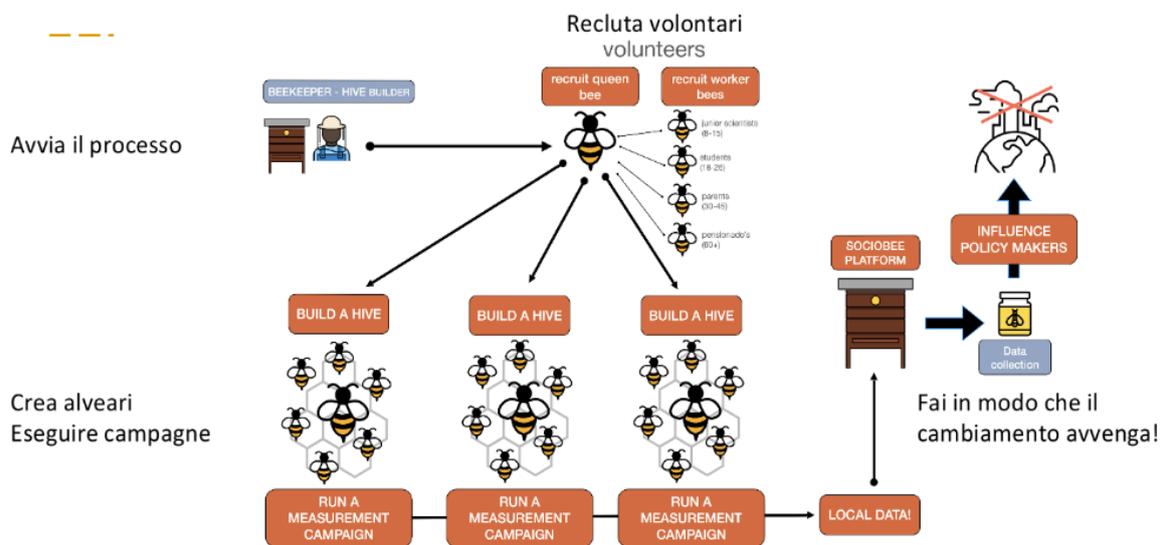
**FIGURA 34.** Retta di regressione lineare della misurazione indoor prima che il LCS arrivi a saturazione



**FIGURA 35.** Istogramma dei residui per la misurazione indoor prima che il LCS arrivi a saturazione

### 3.2. MISURA DELLA QUALITA' DELL'ARIA NEL PROGETTO SOCIO-BEE

Di seguito sono illustrate le modalità in cui sono state effettuate le misurazioni con i sensori di Socio-Bee.



**FIGURA 36.** Modalità di misurazione Socio-Bee

Come si può evincere dal suo nome, il progetto Socio-Bee si basa sul paragone api-uomini.

L'apicoltore (in inglese "Beekeeper") è colui che crea un alveare di api, reclutandole. Recluta sia le cosiddette api regina (in inglese "Queenbees") sia le api lavoratrici (in inglese

“Workerbees”). L’alveare di api nient’altro è che l’insieme delle persone, con più o meno competenze in materia di misurare la qualità dell’aria/inquinamento atmosferico, che hanno come obiettivo comune quello di effettuare delle misurazioni in determinate aree attraverso l’utilizzo dei sensori Socio-Bee. Le api regina si distinguono dalle api lavoratrici in quanto le prime rappresentano coloro che possiedono ampie conoscenze riguardo ciò che si misura, perché si misura e come si misura a differenza delle seconde che invece hanno il solo obiettivo di prestarsi il più possibile al progetto effettuando quante più misurazioni possibili in opportune zone. Esempi concreti di api regina potrebbero essere i ricercatori e i professori universitari mentre le sembianze di api lavoratrici potrebbero assumerle bambini, studenti, adulti e anziani. I risultati verranno poi scaricati e analizzati da chi di dovere, per poi fare in modo, in base a quali valori saranno osservati, di influenzare le decisioni politiche in merito alla materia considerata. Il tutto, ovviamente, prima necessiterà di confronti con le stazioni di riferimento dell’ARPAM per verificare l’attendibilità dei valori misurati per ciascun parametro considerato.

### 3.2.1. SET-UP DI MISURA PER LE MISURAZIONI OUTDOOR

#### - SENSORI PER LA MISURA DELLA QUALITÀ DELL’ARIA

Socio Bee è un progetto che nasce per misurare la qualità dell’aria in specifiche zone attraverso dei sensori il cui funzionamento è governato da un fotodiodo, lavorando quindi in base a come e a quanto vengono investiti da un fascio di luce. Misurano tutti i parametri riguardanti la qualità dell’aria e l’inquinamento atmosferico ma noi ci concentreremo in particolare su  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$  e  $\text{PM}_{2,5}$ . Misurano i rispettivi valori sia in modalità statica (misurazioni indoor) tramite WiFi sia in modalità dinamica/mobile (misurazioni outdoor) tramite Bluetooth. Noi ci occuperemo del secondo caso.

In seguito, in una apposita sezione illustreremo le caratteristiche e le specifiche dei sensori Socio-Bee (**FIGURA 37**)



**FIGURA 37.** Design dei sensori Socio-Bee

## - POWER BANK

Per le misurazioni outdoor, un power bank è stato connesso al sensore Socio-Bee per aumentare la capacità della batteria durante le misurazioni.



**FIGURA 38.** Power bank

## - PIATTAFORMA DEL PROGETTO SOCIO-BEE

Si può accedere alla piattaforma attraverso questo link: <https://academe.it/gr/login>

Title	Location	Date Range	My Role	Status	Progress
First Campaign @UNIVPM	Via Breccie Bianche 12, Ancona, 60131	23/05/2023 09:25 - 26/05/2023 09:25	Queen Bee	COMPLETED	100%
Campaign 1st June	Via Breccie Bianche 12, Ancona, 60128	01/06/2023 03:10 - 01/06/2023 11:10	Queen Bee	COMPLETED	100%
prova 1 giugno	Via Breccie Bianche 12, Ancona, 60131	01/06/2023 03:15 - 01/06/2023 06:15	Queen Bee	COMPLETED	100%
Prova 2 univpm	Via Breccie Bianche 12, Ancona, 60131	01/06/2023 03:45 - 01/06/2023 05:45	Queen Bee	COMPLETED	100%
Campaign 7th June	Via Breccie Bianche 12, Ancona, 60128	07/06/2023 03:00 - 07/06/2023 11:59	Queen Bee	COMPLETED	100%
Trial (small and less point)	via breccie bianche 12, Ancona, 60128	08/06/2023 02:34 - 08/06/2023 04:15	Queen Bee	COMPLETED	100%
alpha ancona seconda prova	Pizza XXIV Maggio, Ancona, 60122	12/06/2023 11:50 - 13/06/2023 11:50	Worker Bee	COMPLETED	100%
Splitech Data Campaign #1	Via Circonvallazione Ancona, Ancona, 60122	13/06/2023 12:55 - 16/06/2023 01:49	Queen Bee	COMPLETED	100%

**FIGURA 39.** Piattaforma Socio-Bee

Attraverso questa piattaforma è possibile accedere come apicoltori e creare gli alveari. Una volta che gli alveari sono stati creati (nei quali vediamo la presenza delle api regina che delle api lavoratrici) le api regina provvedono a creare la campagna di misurazione.

La campagna non è altro che la regione nella quale si effettuerà la misurazione. Si crea a partire dalla mappa geografica messa a disposizione dalla piattaforma: si individua il punto centrale su cui improntarla e da lì si provvede a realizzare un'area circolare di raggio pari a quello stabilito da chi intende misurare. È facile evincere che le aree su cui si realizzano le misurazioni sono sempre circolari.

A seguire si conferirà un titolo e un ID alla campagna stessa per identificarla, poi un tempo entro il quale effettuare le relative misurazioni e una descrizione appropriata. Seguirà poi specificare la città, l'indirizzo, la latitudine e la longitudine del luogo considerato.

Ogni campagna al proprio interno è costituita da punti equidistanti, nei quali si attuano le misurazioni richieste. La distanza tra punti è prestabilita dall'ape regina, a seconda che si voglia misurare in punti più o meno lontani tra loro. Nei punti andranno a misurare sia le api regina che le api lavoratrici dell'alveare prescelto e quando si arriva in ognuno di essi bisognerà attendere un tempo effettivo di misura pari a 1 minuto.

Una volta realizzata la campagna essa sarà pubblicata. Dopo essere stata pubblicata passerà all'essere allo stato attivo e infine a uno stato concluso/terminato.

Una campagna è *pubblicata* quando è stata realizzata correttamente ma ancora non si è entrati all'interno del range di tempo prestabilito entro il quale effettuare la misurazione.

Una campagna è *attiva* quando è stata realizzata correttamente e si è entrati all'interno del range di tempo prestabilito entro il quale effettuare la misurazione.

Una campagna è *terminata (o completata)* quando è stata realizzata correttamente ed è stato superato il range di tempo prestabilito entro il quale effettuare la misurazione.

The screenshot displays a web application interface for managing a beekeeping campaign. The interface is divided into several sections:

- Header:** Campaign ID: 80
- Form Fields:**
  - Thumbnail:
  - Title: Ancona Cittadella 22/06 #-
  - Description: Test for Ale's thesis
  - Datetime Range: 06/22/2023 16:50 - 06/23/2023 16:50
  - City: Ancona
  - Address/District: Ancona Cittadella
  - Postcode: 60122
  - Latitude: 43.612444
  - Longitude: 13.510995
  - Radius(m): 51
- Map:** A map of Ancona showing a circular measurement area centered on a point in the city. The area is marked with a blue circle and contains several red and blue dots representing measurement points.
- Table:** A table showing the campaign's progress. The table has four columns: Name, Username, Measurement Points, and Feedback. The data row shows: Name: Nicole Morresi, Username: nikinicole, Measurement Points: 13, Feedback: Yes.
- Status:** A green button labeled "COMPLETED" is visible in the top right corner of the form area.

**Figura 40.** Campagna realizzata correttamente e completata

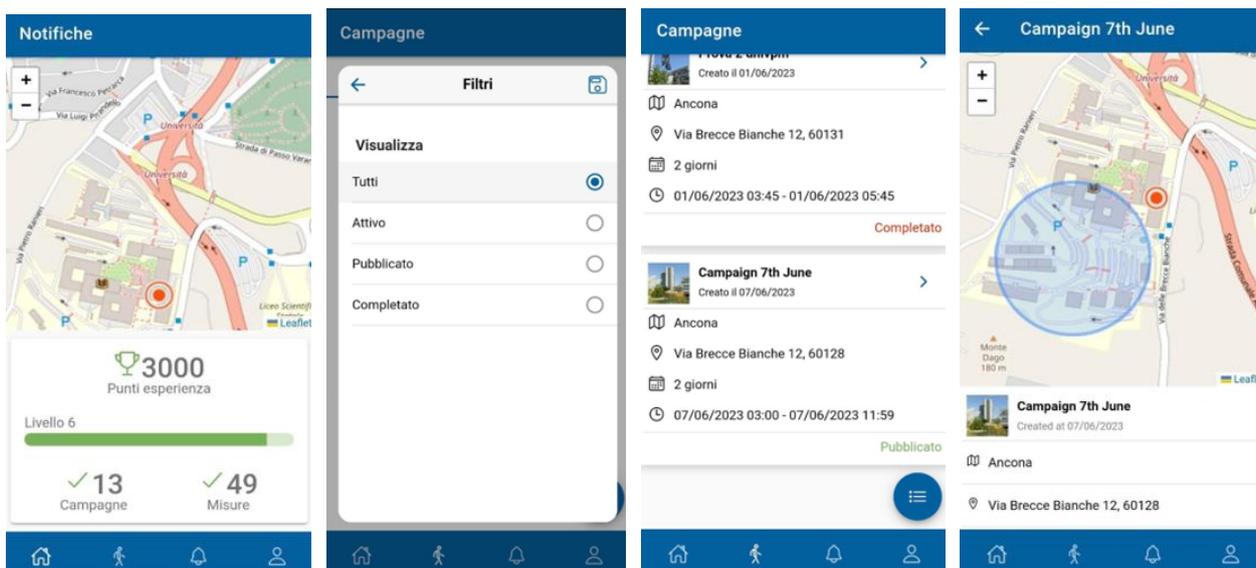
## - DISPOSITIVO ANDROID DA CONNETTERE AL SENSORE

Dispositivo Android, che sia tablet o smartphone, al quale viene collegato il sensore con il quale si effettua la misurazione. Per ogni sensore Socio-Bee è necessario un dispositivo di questo tipo.



**Figura 41.** Dispositivo Android (tablet e smartphone)

Di seguito sono riportate le schermate dell'applicazione Socio-Bee sul dispositivo Android durante le misurazioni.

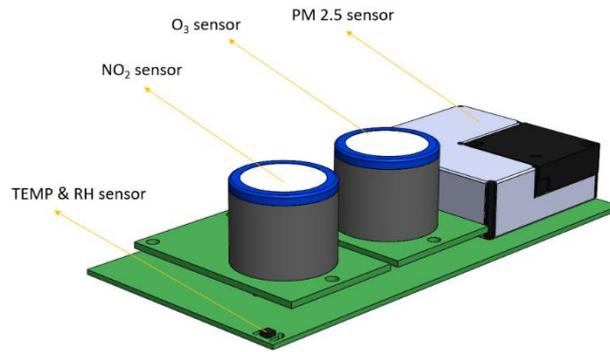


**Figura 42.** Alcune schermate del dispositivo Android di colui che misura con il sensore Socio-Bee

### 3.2.1.1. CARATTERISTICHE E SPECIFICHE DEI SENSORI SOCIO-BEE

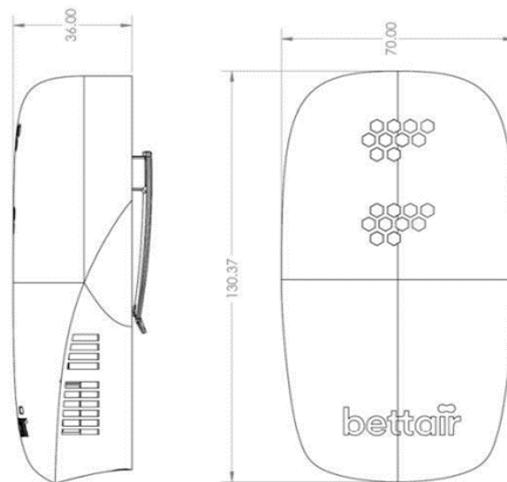
Il sensore Socio-Bee vede a sua volta al suo interno quattro sensori principali:

1. Sensore per la misura di  $PM_{2.5}$
2. Sensore per la misura di umidità relativa (RH)
3. Sensore per la misura di  $O_3$
4. Sensore per la misura di  $NO_2$



**Figura 43.** Sensori interni al sensore Socio-Bee

Per quanto riguarda le dimensioni del sensore facciamo riferimento alla **FIGURA 44** sottostante.



**FIGURA 44.** Dimensioni del sensore Socio-Bee

Le dimensioni del sensore sono di 130,37 mm in lunghezza, 70 mm in larghezza e 35 mm in altezza.

A proposito, invece, della massa posseduta dall'intero sensore facciamo riferimento alla **TABELLA 3** sottostante.

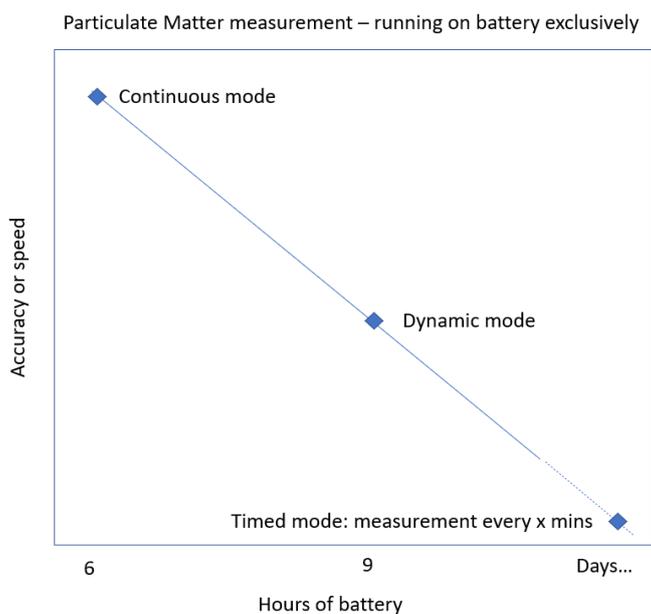
<b>ELEMENTO</b>	<b>MASSA (gr)</b>
<b>PM sensor</b>	21.00
<b>Gas O3-A4</b>	6.00
<b>Gas NO2-A4</b>	6.00
<b>Case</b>	40.00
<b>Battery</b>	15.00
<b>Electronics</b>	20.00
<b>TOTALE</b>	106

**TABELLA 3.** Massa complessiva del sensore Socio-Bee

Ricordiamo che noi ci occuperemo delle misure di PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>2</sub> e O<sub>3</sub>.

- **SENSORE CHE MISURA PM<sub>2.5</sub>**

Dei quattro sensori sopra elencati interni al sensore Socio-Bee, il più limitante in termini di consumo energetico è il sensore che rileva il PM<sub>2.5</sub>, che può essere configurato in diverse modalità in relazione alla reciproca dipendenza tra precisione, velocità e consumo. Il sensore che rileva PM<sub>2.5</sub> ha un tempo di risposta di 1 secondo, quindi il fattore limitante per la velocità di misurazione è sempre la modalità di rilevamento.



**FIGURA 45.** Diverse modalità con cui lavora il sensore che rileva il PM<sub>2.5</sub>

Il sensore che rileva PM<sub>2.5</sub>, come è possibile vedere nella **FIGURA 45**, può lavorare secondo tre diverse modalità. Illustriamole con la **TABELLA 4** di seguito.

<b>MODALITA'</b>	<b>DURATA</b>	<b>ENERGIA CONSUMATA</b>	<b>BATTERIA USATA</b>
<i>Misurazione singola</i>	36s	1mW·h	1/2442 mW·h (0.04%)
<i>Misurazione continua</i>	Ogni 1s	500mW·h	500/2442 mW·h  Durata massima di 5 ore
<i>Misurazione dinamica (a seconda dell'ambiente, meno accurata)</i>	Variabile/ ogni 30s	250mW·h	250/2442 mW·h Durata massima di 9 ore

**TABELLA 4.** Modalità di misurazione del sensore che rileva PM<sub>2.5</sub>

Quando si utilizza la batteria, il sensore che rileva PM2.5 costituisce il consumo maggiore. Può funzionare solo un giorno senza ricarica, quando i cambiamenti di valore di PM2.5 non sono molto veloci.

Per avere misurazioni con la miglior accuratezza e la miglior velocità di risposta possibile, la campagna di misurazione non dovrebbe durare più di sei ore se il sensore non è collegato (al power bank, ad esempio).

La modalità dinamica produrrà probabilmente risultati abbastanza buoni per la maggior parte degli scenari, il che significa che le campagne che vedono attaccato il sensore alla batteria possono durare fino a 12-14 ore.

#### - **SENSORI CHE MISURANO I GAS TOSSICI NO<sub>2</sub> E O<sub>3</sub>**

Per i sensori di gas tossici il consumo di energia è molto inferiore, circa un fattore 10 in meno rispetto al sensore che rileva PM<sub>2.5</sub>, quindi in generale non sono il fattore limitante per il dispositivo in termini di durata della batteria. Tuttavia, sono limitati in termini di velocità di misurazione e hanno un tempo di reazione dipendente dal gas misurato e dall'ambiente. Ecco un riepilogo delle specifiche dei sensori che misurano NO<sub>2</sub> e O<sub>3</sub>.

<b>GAS</b>	<b>LIVELLO DI DEFINIZIONE</b>	<b>ACCURATEZZA INIZIALE CALIBRATA</b>	<b>TEMPO DI RISPOSTA</b>	<b>MASSA</b>
<b>NO<sub>2</sub></b>	<5ppb	5ppb	80s	6 gr
<b>O<sub>3</sub></b>	<5ppb	5ppb	80s	6 gr

**Tabella 5.** Specifiche dei sensori che rilevano NO<sub>2</sub> e O<sub>3</sub>

Pertanto, i sensori di gas tossici limitano gli scenari dell'utente nell'aspetto del tempo di risposta.

Una persona a passo d'uomo non individuerà molto bene cambiamenti rapidi di gas tossici intorno a sé dovuti al passaggio di un'auto o di una fonte di gas tossico molto localizzata in un punto di una strada. Nel caso degli autobus questo è anche peggio: la circolazione veloce degli autobus si tradurrà solo in risultati altamente qualitativi, non quantitativi, per i sensori di gas tossici.

### **3.2.2. CAMPAGNE DI MISURA**

Abbiamo effettuato delle campagne di misurazioni per i seguenti fini:

- 1 - Confrontare** l'affidabilità dei sensori Socio-Bee attraverso il confronto dei valori misurati dai sensori dell'ARPAM situati alla stazione ferroviaria e al Parco della Cittadella di Ancona
- 2 - Valutare** la distanza ottimale tra i punti interni all'area della campagna per effettuare una misurazione
- 3 - Valutare** eventuali differenze di misurazioni tra i sensori, considerandoli nello stesso intervallo di tempo e nello stesso spazio

Le zone prese in considerazione per effettuare le campagne sono state:

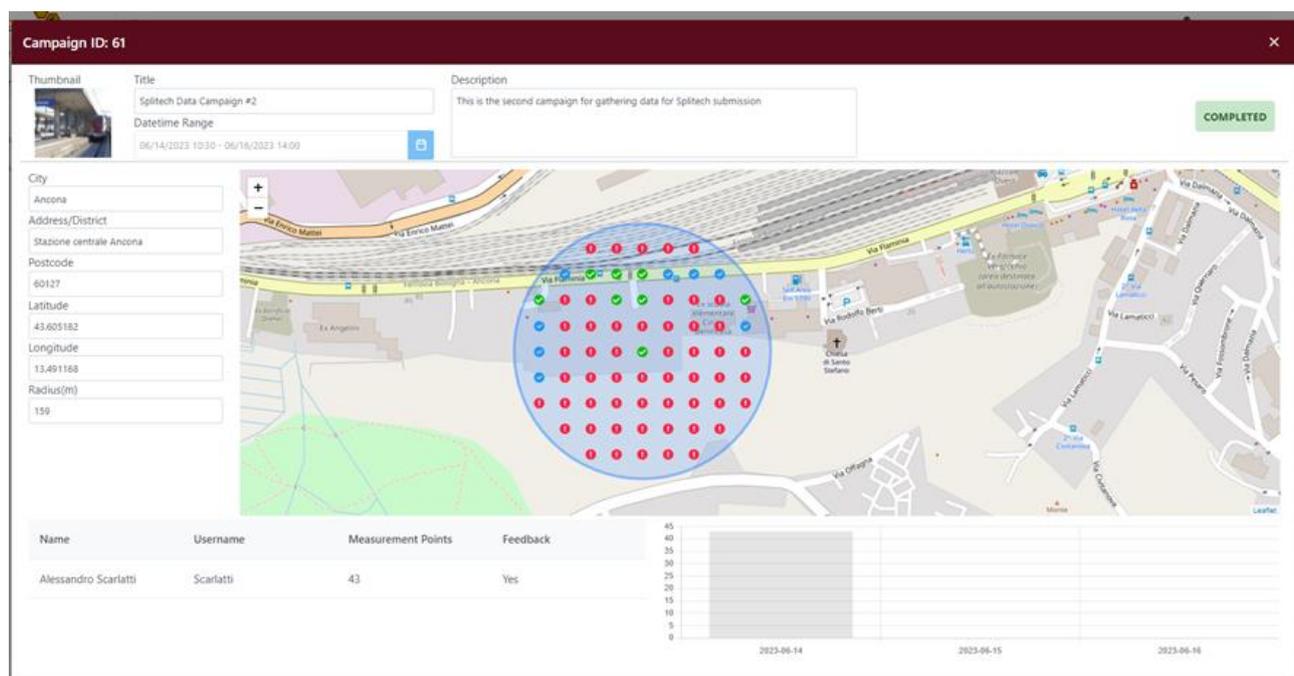
- A** – Stazione ferroviaria di Ancona
- B** – Parco della Cittadella di Ancona
- C** – Viale della Vittoria (Ancona)

Le prove sono state divise in tre principali campagne e due tra queste vedono a loro volta due “sotto-campagne”. In pratica, si avranno cinque campagne di misurazioni.

### - **CAMPAGNA 1**

Il luogo in cui è stata effettuata la prima campagna di misurazioni è la stazione ferroviaria di Ancona. Il giorno in cui la prova è stata effettuata è il 14/06/2023. Il raggio considerato è pari a 159 metri, con una distanza tra punti interni alla campagna di 30 metri. È stato utilizzato un solo sensore Socio-Bee, chiamato 1E58DD.

L’obiettivo di questa campagna è stato quello di confrontare l’affidabilità del sensore Socio-Bee attraverso il confronto dei valori da esso misurati e dei valori misurati dal sensore dell’ARPAM situato presso la stazione di Ancona, usato come riferimento. I parametri considerati sono PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>2</sub> e O<sub>3</sub>.



**FIGURA 46.** Campagna 1 effettuata presso la stazione ferroviaria di Ancona

### - **CAMPAGNA 2**

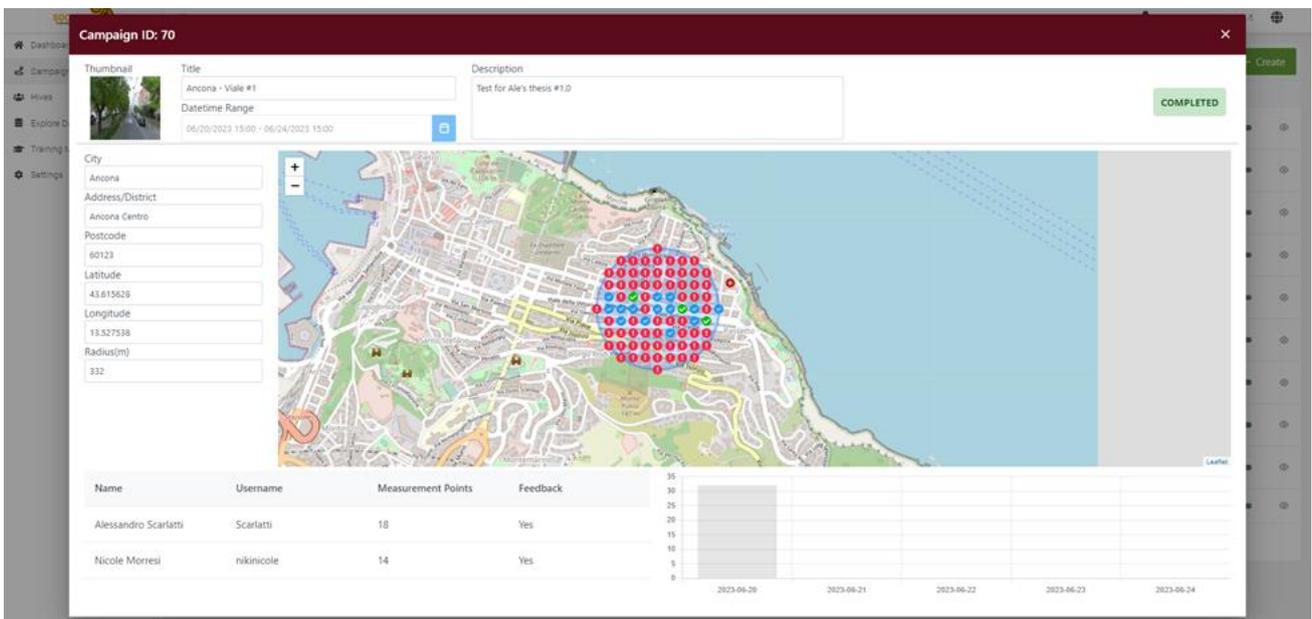
Questa campagna, come già anticipato, si suddivide a sua volta in altre due campagne che chiameremo rispettivamente 2.1 e 2.2. Il luogo, il tempo e il raggio delle due campagne

coincidono tra loro. Quello che cambia è la distanza tra i punti interni e la quantità di sensori utilizzati per ciascuna campagna.

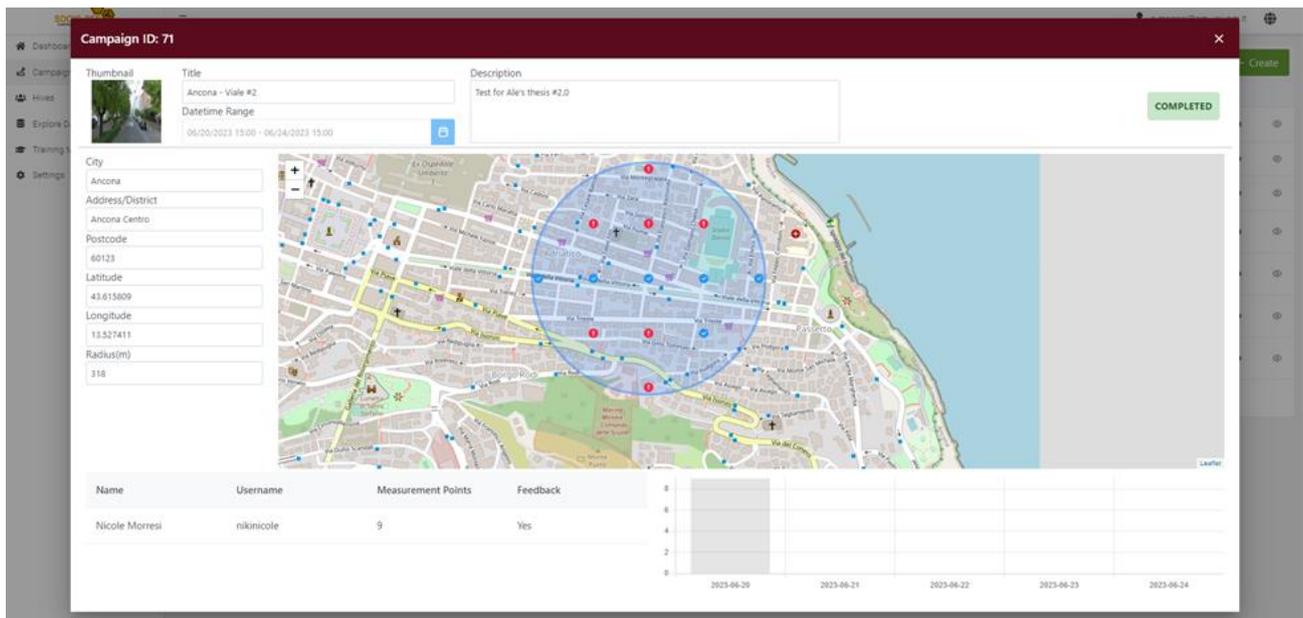
Il luogo in cui sono state effettuate le campagne di misurazioni è il Viale della Vittoria (Ancona). Il giorno in cui abbiamo misurato è il 20/06/2023. Il raggio considerato è pari a 332 metri.

La distanza tra punti interni alla campagna 2.1 è pari a 60 metri, mentre per la campagna 2.2 è pari a 120 metri. È stato utilizzato un solo sensore Socio-Bee per quest'ultima, chiamato 1C7AB5, mentre sono stati utilizzati due sensori per la prima, chiamati rispettivamente 1E58DD e 1BA231.

Gli obiettivi di questa campagna sono stati: la valutazione dell'affidabilità dei sensori Socio-Bee attraverso il confronto dei valori da essi misurati e dei valori misurati dai sensori dell'ARPAM situati presso la stazione e il Parco della Cittadella di Ancona, usati come riferimento; la stima della distanza ottimale tra i punti interni all'area campagna per ottenere risultati validi e affidabili; la valutazione di eventuali differenze di misurazioni tra sensori, considerando le misure effettuate nello stesso intervallo di tempo e nello stesso spazio. Per quest'ultimo scopo è stata esclusivamente valutata la campagna 2.1, in quanto vede l'utilizzo di due sensori e quindi entrambi misuranti in punti equidistanti.



**FIGURA 47.** Campagna 2.1 effettuata presso Viale della Vittoria (Ancona)



**FIGURA 48.** Campagna 2.2 effettuata presso Viale della Vittoria (Ancona)

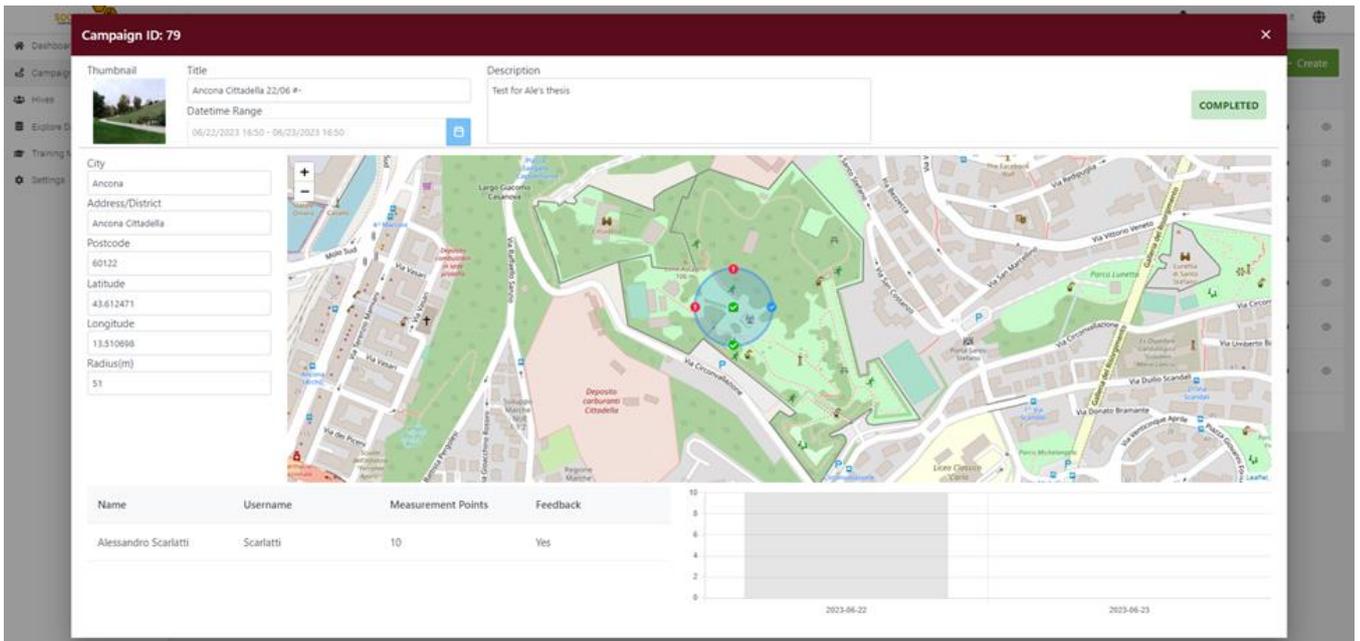
### - **CAMPAGNA 3**

Questa campagna, come la seconda campagna, si suddivide a sua volta in altre due campagne, rispettivamente 3.1 e 3.2. Il luogo, il tempo e il raggio delle due campagne coincidono tra loro. Quello che cambia è la distanza tra i punti interni ma in questo caso non varia la quantità di sensori utilizzati per ciascuna campagna, pari a uno in entrambe.

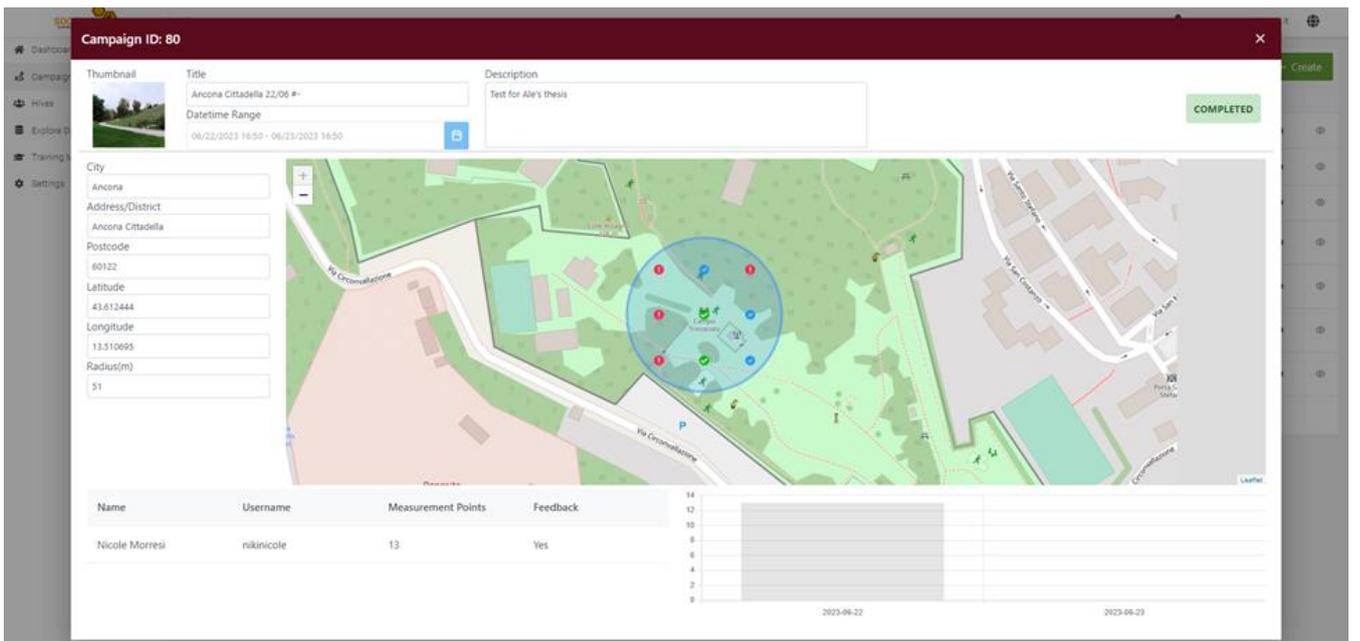
Il luogo in cui sono state effettuate le campagne di misurazioni è il Parco della Cittadella di Ancona. Il giorno in cui le misurazioni sono state effettuate è il 22/06/2023. Il raggio considerato è pari a 51 metri.

La distanza tra punti interni alla campagna 3.1 è di 50 metri, mentre per la campagna 3.2 è di 30 metri. Per entrambe è stato utilizzato un solo sensore Socio-Bee: per quest'ultima il sensore 1E58DD, mentre per la prima il sensore 1BA231.

Gli obiettivi di questa campagna sono stati: la valutazione dell'affidabilità dei sensori Socio-Bee attraverso il confronto dei valori da essi misurati e dei valori misurati dal sensore dell'ARPAM situato presso il Parco della Cittadella di Ancona, usato come riferimento; la stima della distanza ottimale tra i punti interni all'area campagna per ottenere risultati validi e affidabili; la valutazione di eventuali differenze di misurazioni tra sensori, considerando lo stesso intervallo di tempo e lo stesso spazio.



**FIGURA 49.** Campagna 3.1 effettuata presso il Parco della Cittadella di Ancona



**FIGURA 50.** Campagna 3.2 effettuata presso il Parco della Cittadella di Ancona

### 3.2.3. ANALISI DATI

Per l'analisi dei dati di queste misurazioni outdoor abbiamo utilizzato i seguenti parametri:

#### - **ERRORE PERCENTUALE**

L'errore percentuale è una tipologia di calcolo di errore e indica la differenza tra il valore misurato (o approssimato, se non è possibile misurare) e il valore reale.

Il calcolo dell'errore percentuale ha un duplice scopo: valutare quanto un valore misurato si avvicina a quello reale e comprendere quale tipologia di errore interviene nella misurazione (attrezzo di misurazione poco sensibile, errore commesso da colui o colei che misura, errore di arrotondamento, ecc.).

La formula per calcolarlo è la seguente:

$$EP = \frac{VM - VN}{VN} \times 100$$

dove

- **EP**: errore percentuale
- **VM**: valore misurato
- **VN**: valore noto

L'errore percentuale è stato utilizzato per confrontare le medie dei valori misurati dai sensori Socio-Bee con le medie misurate dai sensori dell'ARPAM, per ciascun parametro considerato (PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>2</sub> e O<sub>3</sub>). L'altro uso dell'errore percentuale è per calcolare gli eventuali scostamenti dei valori misurati dai sensori Socio-Bee, nello stesso intervallo di tempo e nello stesso spazio

#### - **MEDIA ARITMETICA**

La media aritmetica di due o più numeri, o semplicemente media, è la somma dei valori numerici divisa per il numero di valori numerici considerati. Per calcolare la media tra due o più numeri basta sommarli e dividere il risultato per il numero di valori:

$$MA = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

dove

- **MA**: media aritmetica
- **x<sub>n</sub>**: n-esimo valore misurato
- **n**: numero di valori misurati

Essa servirà per il calcolo dell'errore percentuale.

## - DEVIAZIONE STANDARD

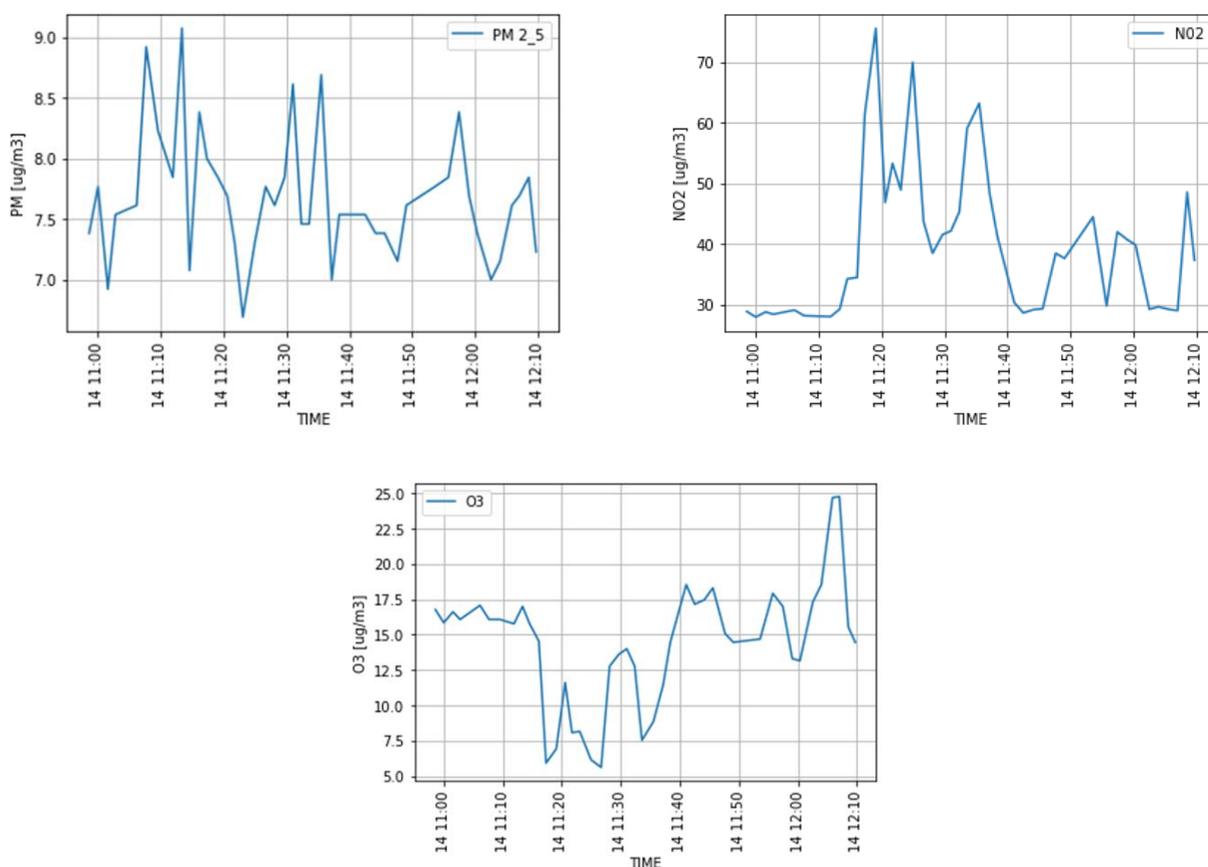
Già citata in 3.1.3, è stata utilizzata nell'analisi delle misure effettuate dai sensori Socio-Bee.

### 3.2.4. RISULTATI DELLE CAMPAGNE

#### - CAMPAGNA 1

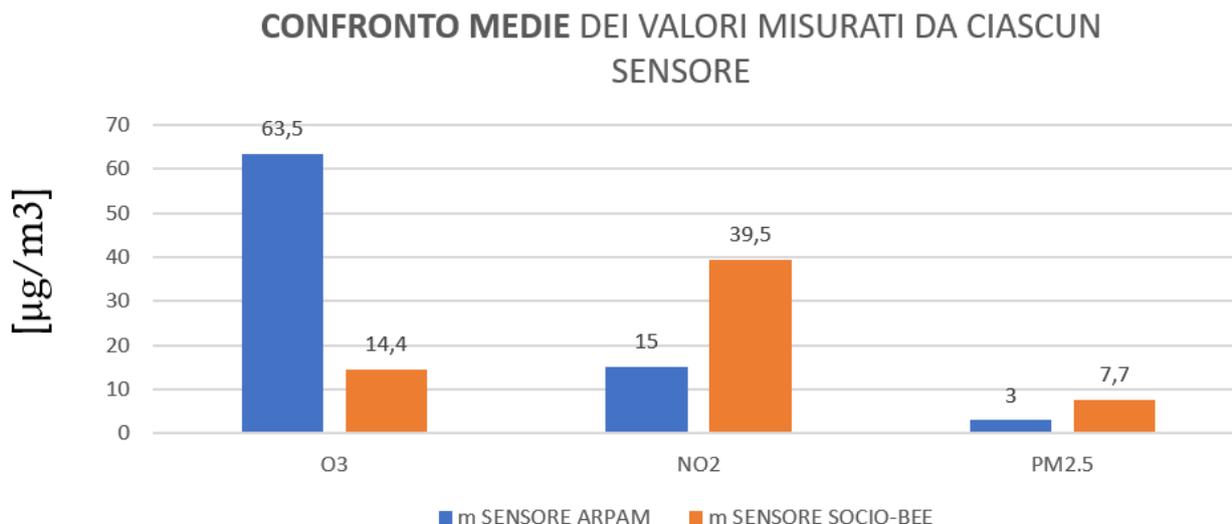
Nei seguenti grafici notiamo l'andamento di PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>2</sub> e O<sub>3</sub>. L'unità di misura è la stessa per ciascun parametro, cioè [µg/m<sup>3</sup>]. Per il PM<sub>2,5</sub> si ha un intervallo di valori compresi tra 6 e 10, per l'NO<sub>2</sub> l'intervallo va da 20 a 80 mentre per l'O<sub>3</sub> da 5 a 30.

Le misurazioni sono state effettuate nella mattinata del 14/06/2023.



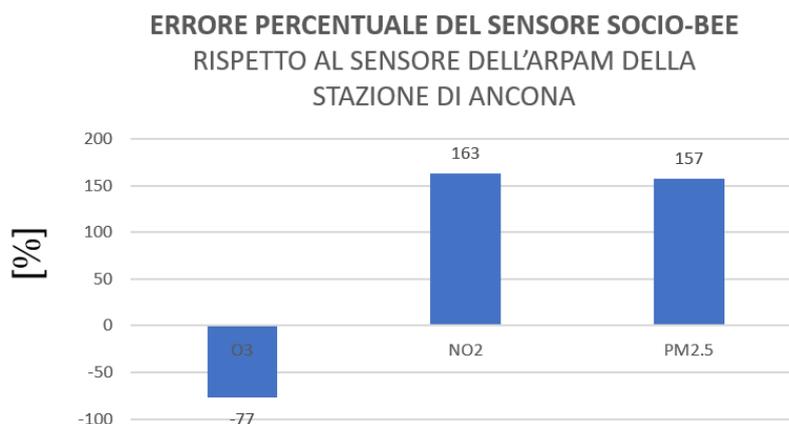
**FIGURA 51.** Andamenti nel tempo di PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>2</sub> e O<sub>3</sub> (campagna 1) per il rispettivo sensore Socio-Bee

Una volta osservati gli andamenti, andiamo ad analizzare i valori ottenuti dalle misure.

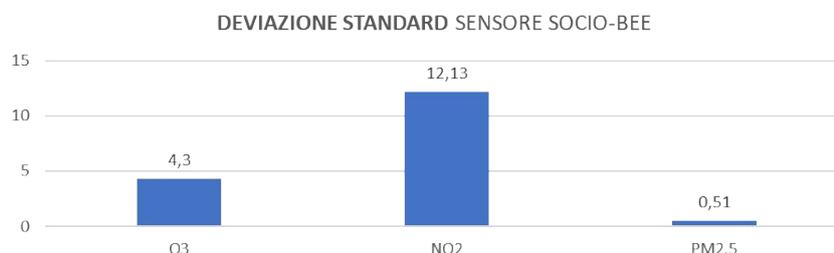


**FIGURA 52.** Confronto delle medie dei valori misurati da ciascun sensore (campagna 1)

Le medie dei valori misurati sono effettuate nello stesso intervallo di tempo.



**FIGURA 53.** Errore percentuale del sensore Socio-Bee rispetto al sensore dell'ARPAM della stazione di Ancona (campagna 1)



**FIGURA 54.** Deviazione standard del sensore Socio-Bee (campagna 1)

## - CAMPAGNA 2

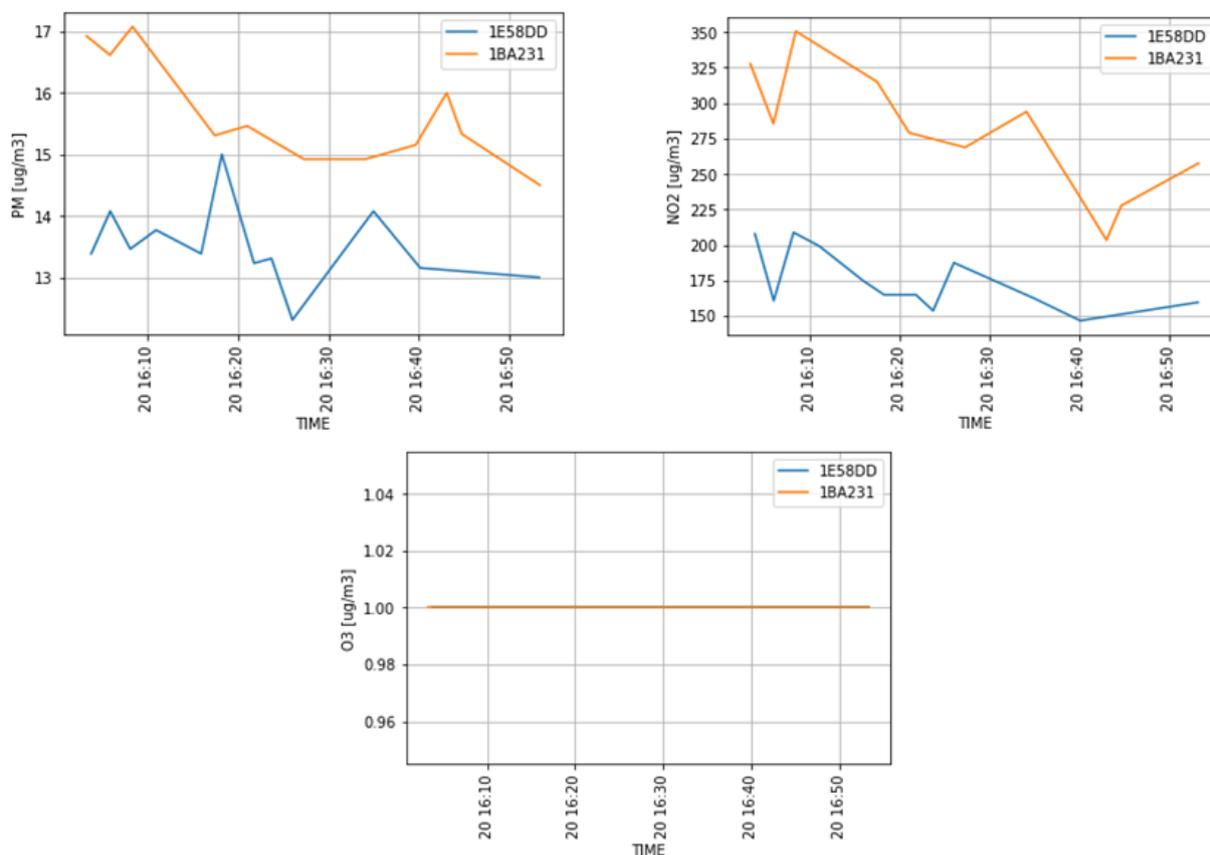
### CAMPAGNA 2.1 (distanza tra punti interni all'area della campagna pari a 60 metri)

Osserviamo gli andamenti di  $PM_{2.5}$ ,  $NO_2$  e  $O_3$  e i risultati ottenuti. Come già detto sopra, l'unità di misura è la stessa per ciascun parametro, cioè  $[\mu g/m^3]$ . In questo caso i sensori sono due per cui è bene distinguere gli intervalli di valori misurati per ciascun sensore.

Nel sensore 1BA231, per il  $PM_{2.5}$  si ha un intervallo di valori compresi tra 14 e 18, per l' $NO_2$  l'intervallo va da 200 a 375 mentre per l' $O_3$  si ha un unico valore costante pari a 1.

Nel sensore 1E58DD, per il  $PM_{2.5}$  si ha un intervallo di valori compresi tra 12 e 15, per l' $NO_2$  l'intervallo va da 125 a 225 mentre per l' $O_3$  si ha un unico valore costante pari a 1.

Le misurazioni sono state effettuate nel pomeriggio del 20/06/2023.

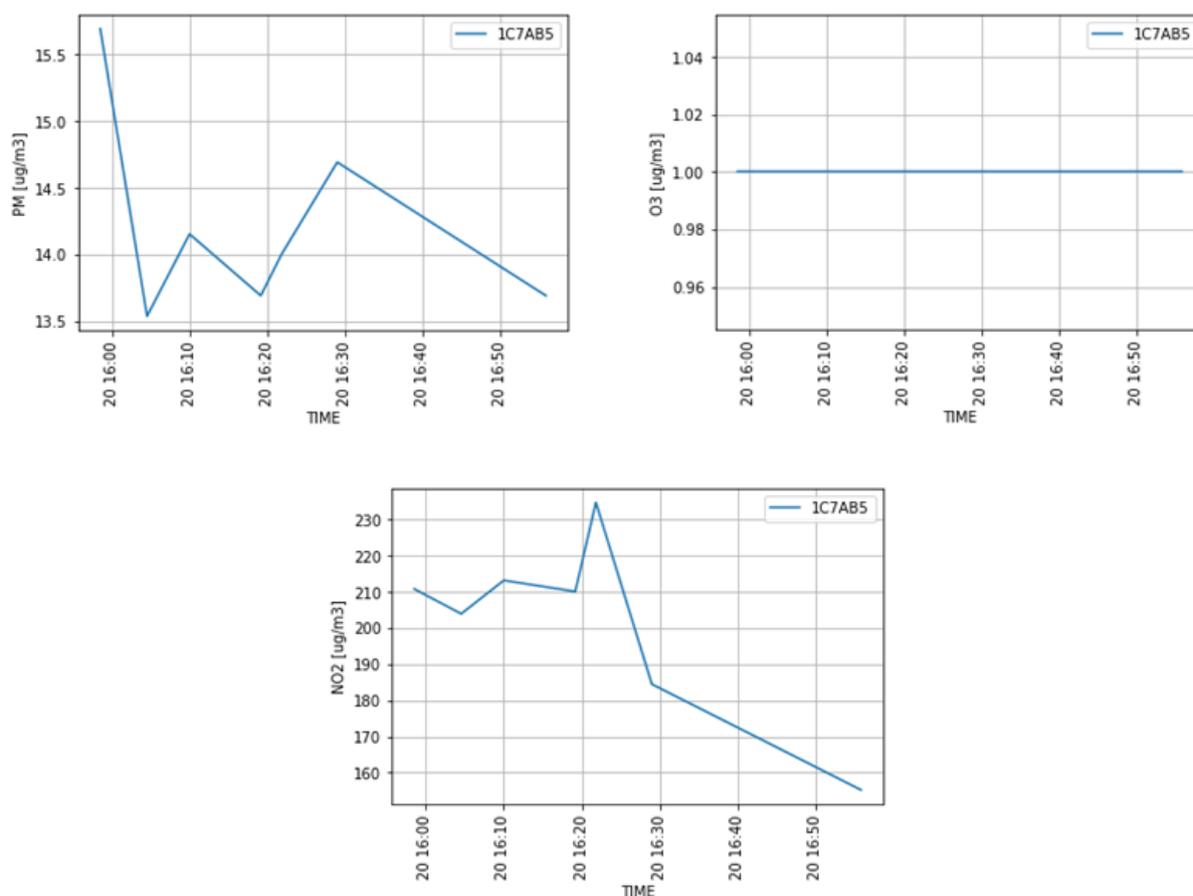


**FIGURA 55.** Andamenti nel tempo di  $PM_{2.5}$ ,  $NO_2$  e  $O_3$  (campagna 2.1) per i rispettivi due sensori Socio-Bee

## CAMPAGNA 2.2 (distanza tra punti interni all'area della campagna pari a 120 metri)

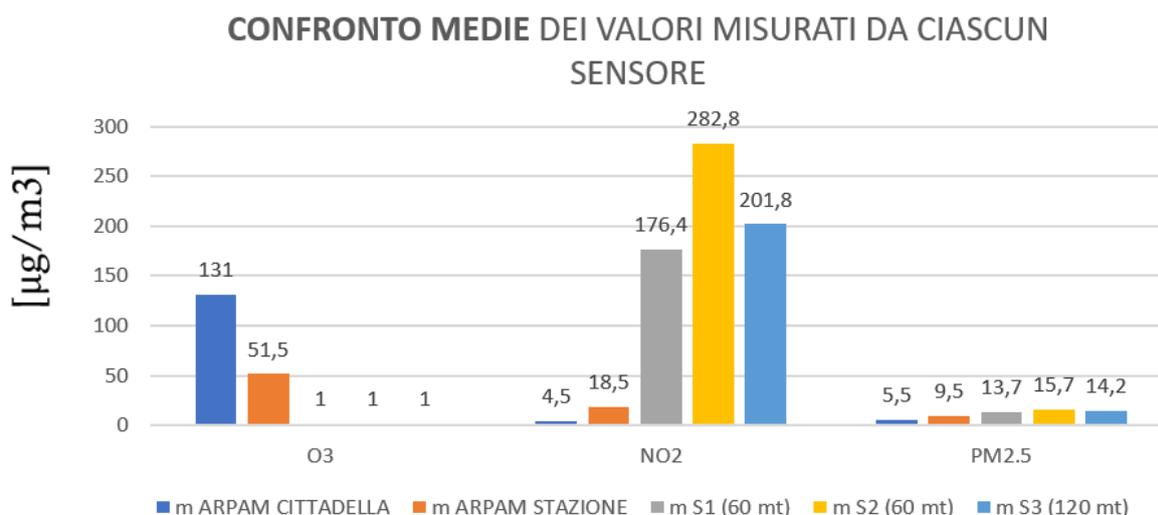
Nei seguenti grafici notiamo l'andamento di  $PM_{2,5}$ ,  $NO_2$  e  $O_3$ . Per il  $PM_{2,5}$  si ha un intervallo di valori compresi tra 13,5 e 16, per l' $NO_2$  l'intervallo va da 150 a 240 mentre per l' $O_3$  si ha un unico valore costante pari a 1.

Le misurazioni sono state effettuate nel pomeriggio del 20/06/2023.



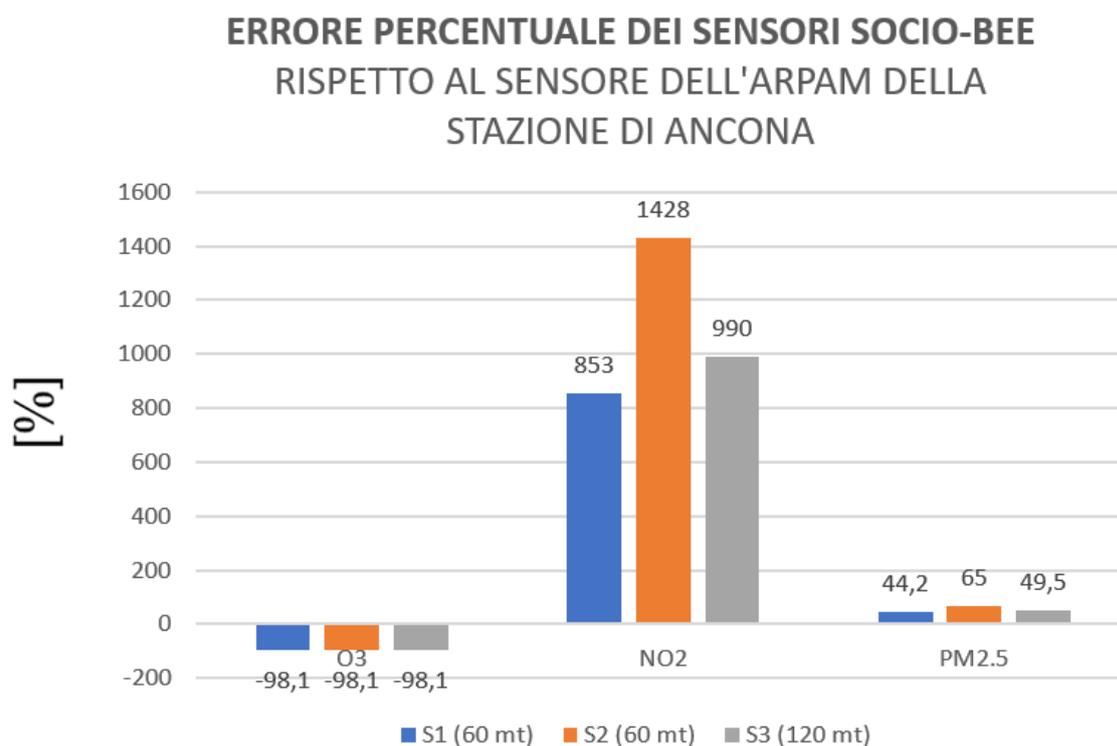
**FIGURA 56.** Andamenti nel tempo di  $PM_{2,5}$ ,  $NO_2$  e  $O_3$  (campagna 2.2) per il rispettivo sensore Socio-Bee

Per i risultati ottenuti chiameremo S1 il sensore 1E58DD, S2 il sensore 1BA231 e S3 il sensore 1C7AB5.

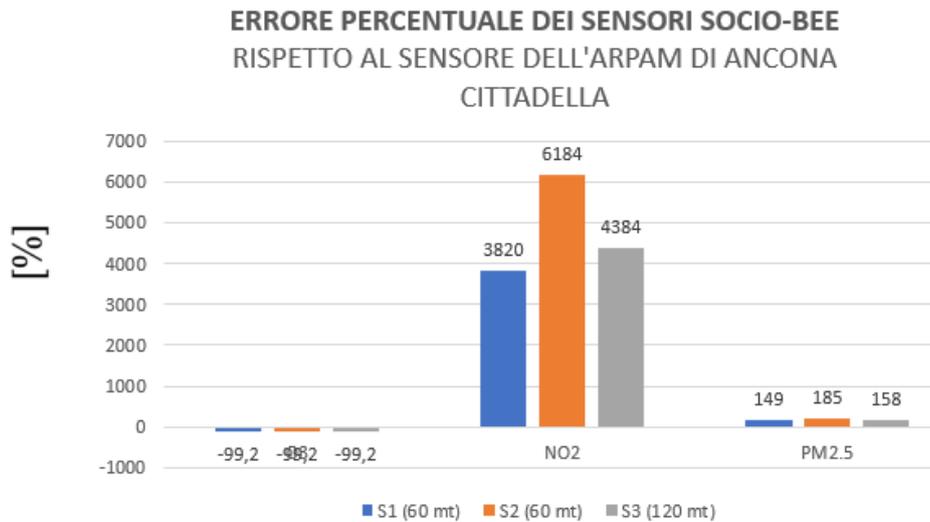


**FIGURA 57.** Confronto delle medie dei valori misurati da ciascun sensore (campagna 2)

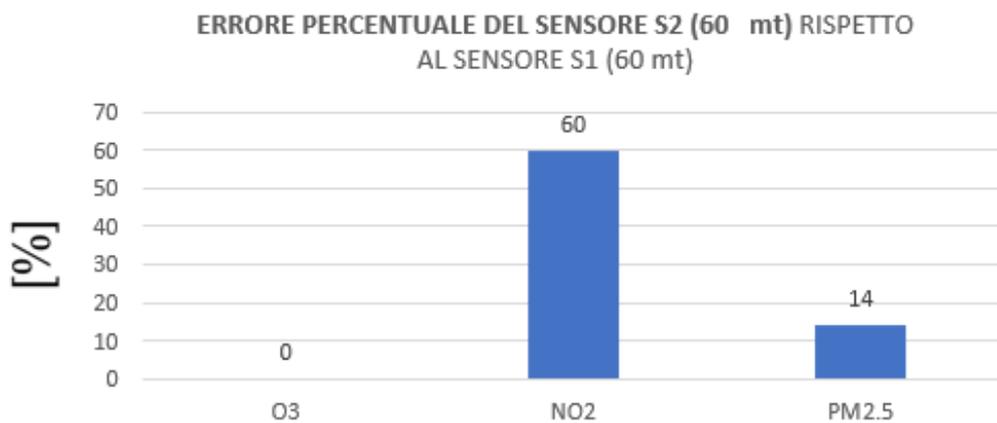
Le medie dei valori misurati sono effettuate nello stesso intervallo di tempo.



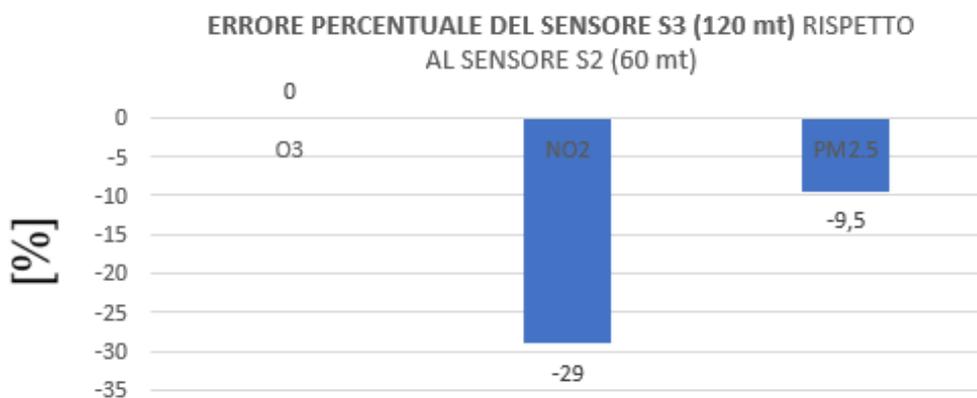
**FIGURA 58.** Errore percentuale dei sensori Socio-Bee rispetto al sensore dell'ARPAM della stazione di Ancona (campagna 2)



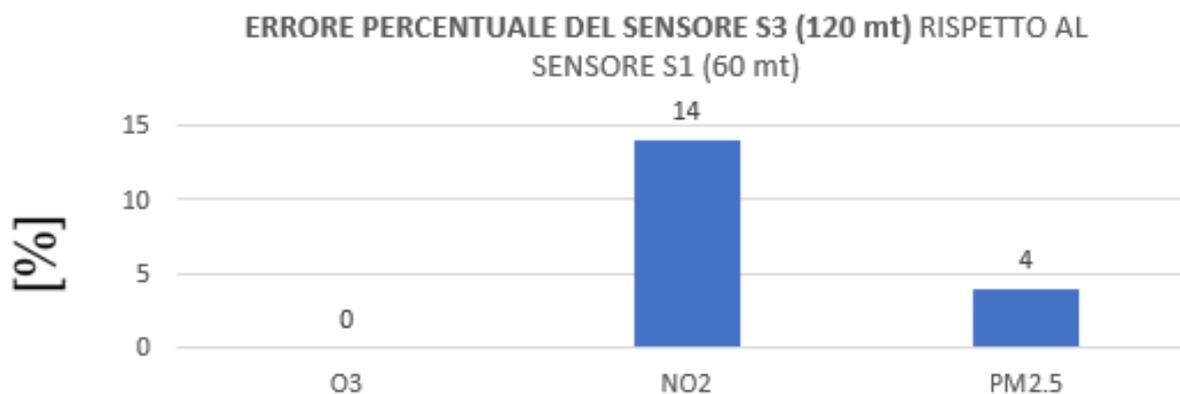
**FIGURA 59.** Errore percentuale dei sensori Socio-Bee rispetto al sensore dell'ARPAM del Parco della Cittadella di Ancona (campagna 2)



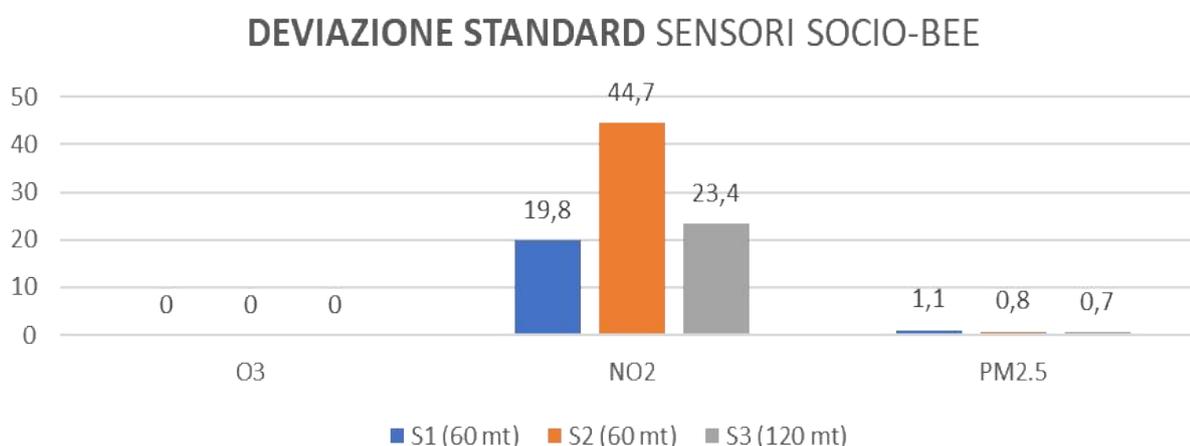
**FIGURA 60.** Errore percentuale del sensore S2 (60 mt) rispetto al sensore S1 (60 mt), entrambi appartenenti alla campagna 2.1



**FIGURA 61.** Errore percentuale del sensore S3 (120 mt) rispetto al sensore S2 (60mt), il primo appartenente alla campagna 2.2 e il secondo appartenente alla campagna 2.1



**FIGURA 62.** Errore percentuale del sensore S3 (120 mt) rispetto al sensore S1 (60 mt), il primo appartenente alla campagna 2.2 e il secondo appartenente alla campagna 2.1



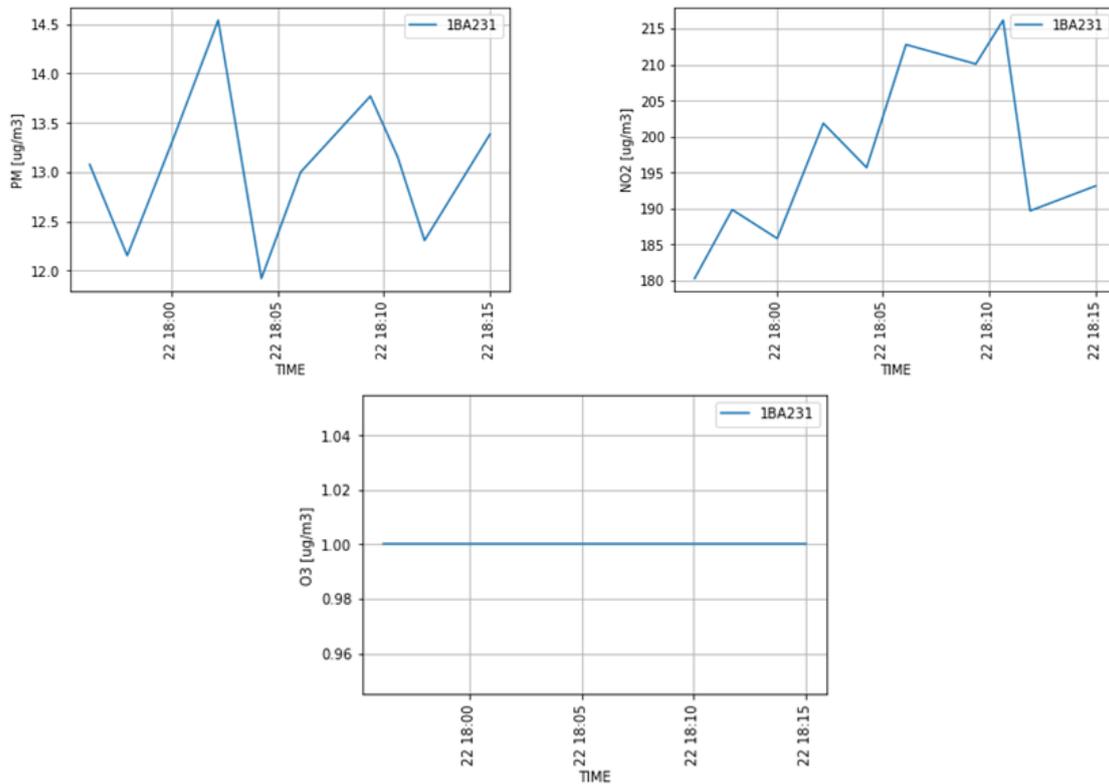
**FIGURA 63.** Deviazione standard dei sensori Socio-Bee appartenenti alla campagna 2

- **CAMPAGNA 3**

**CAMPAGNA 3.1** (distanza tra punti interni all'area della campagna pari a 50 metri)

Osserviamo gli andamenti di PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>2</sub> e O<sub>3</sub> e i risultati ottenuti. Per il PM<sub>2.5</sub> si ha un intervallo di valori compresi tra 11,5 e 15, per l'NO<sub>2</sub> l'intervallo va da 175 a 220 mentre per l'O<sub>3</sub> si ha un unico valore costante pari a 1.

Le misurazioni sono state effettuate nel pomeriggio del 22/06/2023.

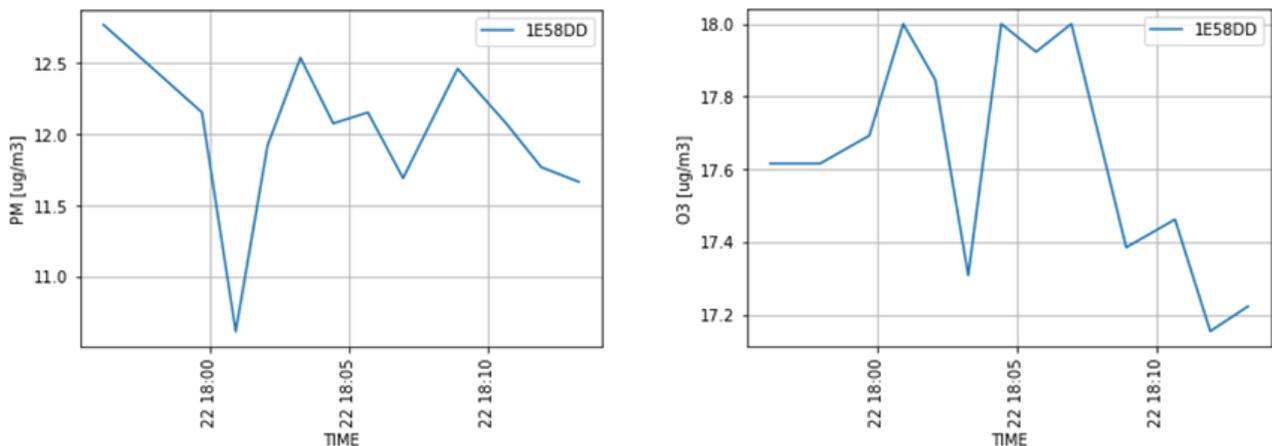


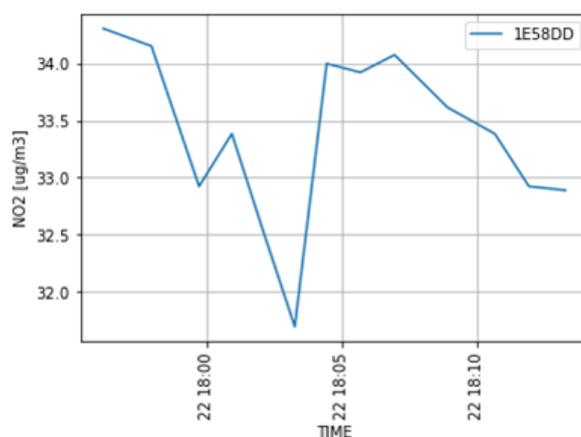
**FIGURA 64.** Andamenti nel tempo di PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>2</sub> e O<sub>3</sub> (campagna 3.1) per il rispettivo sensore Socio-Bee

**CAMPAGNA 3.2** (distanza tra punti interni all'area della campagna pari a 30 metri)

Osserviamo gli andamenti di PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>2</sub> e O<sub>3</sub> e i risultati ottenuti. Per il PM<sub>2.5</sub> si ha un intervallo di valori compresi tra 10,5 e 13, per l'NO<sub>2</sub> l'intervallo va da 31,5 a 34,5 mentre per l'O<sub>3</sub> da 17 a 18.

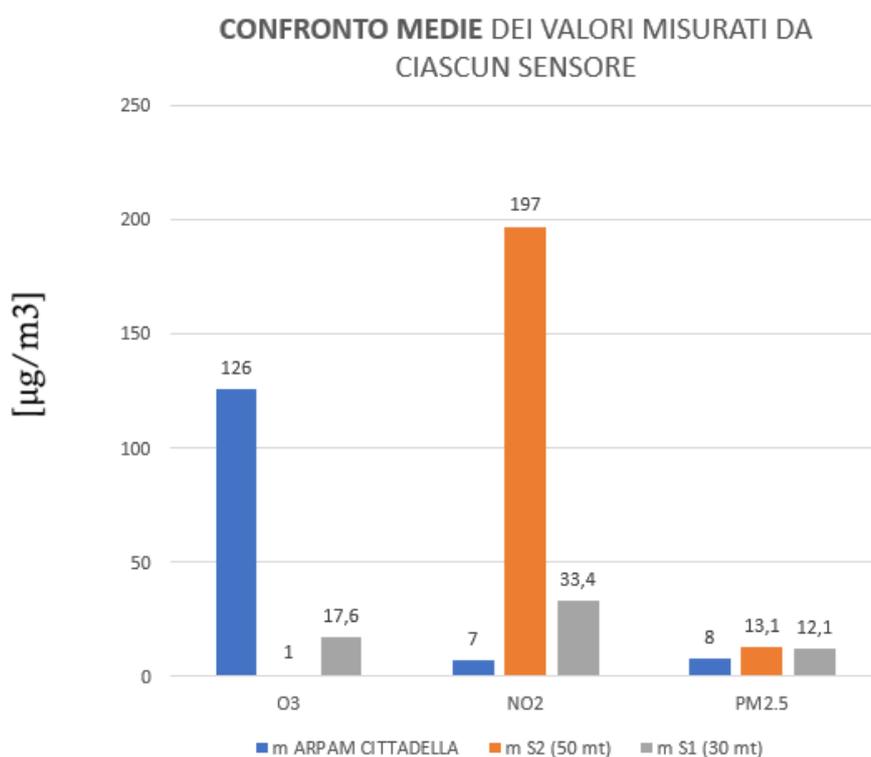
Le misurazioni sono state effettuate nel pomeriggio del 22/06/2023.



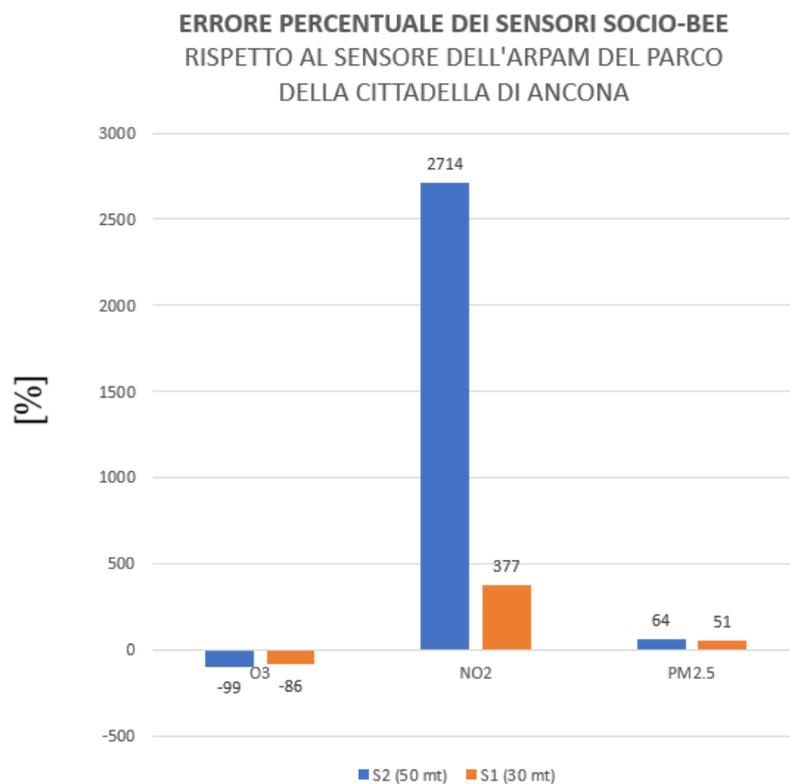


**FIGURA 65.** Andamenti nel tempo di  $PM_{2.5}$ ,  $NO_2$  e  $O_3$  (campagna 3.2) per il rispettivo sensore Socio-Bee

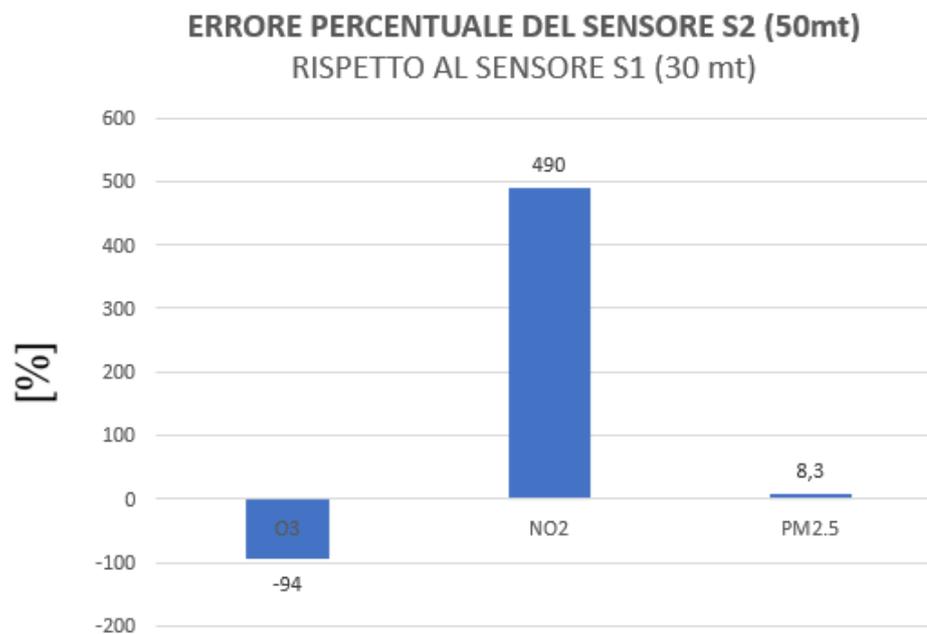
Per i risultati ottenuti chiameremo S1 il sensore 1E58DD, S2 il sensore 1BA231.



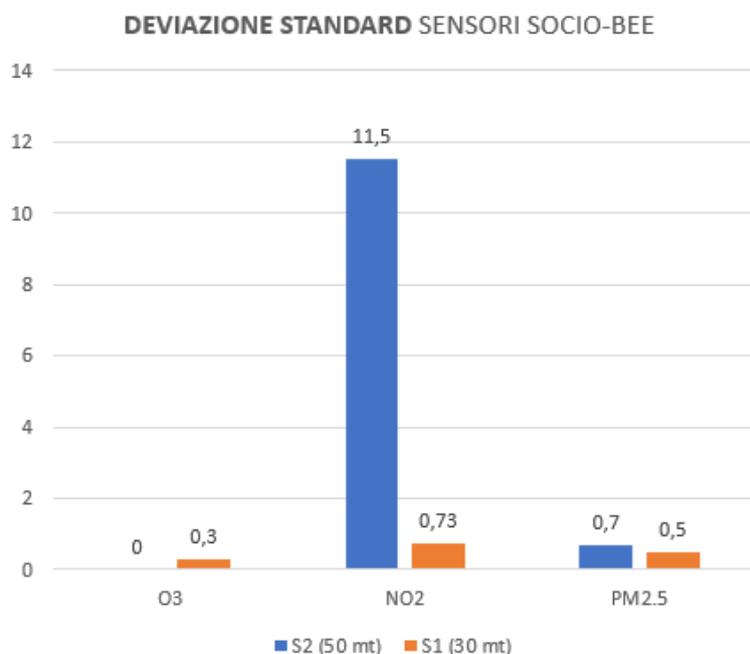
**FIGURA 66.** Confronto delle medie dei valori misurati da ciascun sensore (campagna 3)



**FIGURA 67.** Errore percentuale dei sensori Socio-Bee rispetto al sensore dell'ARPAM del Parco della Cittadella di Ancona (campagna 3)



**FIGURA 68.** Errore percentuale del sensore S2 (50 mt) rispetto al sensore S1 (30 mt), il primo appartenente alla campagna 3.1 e il secondo appartenente alla campagna 3.2.



**FIGURA 69.** Deviazione standard dei due sensori Socio-Bee appartenenti alla campagna 3.

## 4. CONCLUSIONI

Il primo scopo di questo lavoro di tesi è quello di confrontare le prestazioni di sensori LCS per la misura della qualità dell'aria in ambiente indoor. Dal test effettuato, si dimostra che la deviazione standard e l'incertezza calcolate rispetto ai residui valgono rispettivamente  $914 \mu\text{g}/\text{m}^3$  e  $1828 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (utilizzando un fattore di incertezza pari a 2), i quali sono valori di incertezza molto elevati rispetto agli standard.

Iterando la prova in vari tentativi successivi, si è dimostrato che l'andamento del  $\text{PM}_{2.5}$  misurato con il LCS rimane pressoché simile a quello visto nei risultati ottenuti di questo test indoor, sia a livello di forma che di valori. Diventa chiaro pensare che il LCS giunge a una condizione di saturazione, una volta raggiunto un determinato valore di  $\text{PM}_{2.5}$  pari a circa  $4300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Il secondo scopo di questa tesi era la valutazione dell'affidabilità dei sensori Socio-Bee attraverso il confronto con i valori misurati dai sensori dell'ARPAM situati alla stazione ferroviaria e al Parco della Cittadella di Ancona, la valutazione della distanza ottimale tra i punti interni all'area della campagna per effettuare una misurazione e la valutazione, infine, di eventuali differenze di misurazioni tra i sensori, considerando misurazioni effettuate nello stesso intervallo di tempo e nello stesso spazio.

Partendo dal primo obiettivo possiamo concludere che l'errore percentuale minore, considerando tutte e cinque le campagne effettuate, rispetto al sensore dell'ARPAM di

riferimento, lo si ha con il sensore S1 (1E58DD) che misurava a una distanza tra punti di 60 m, considerando l'intera campagna 2. Pur essendo il minore si è dimostrato che il sensore misura il 44,2% in più di PM<sub>2.5</sub> rispetto al valore misurato dal sensore dell'ARPAM della stazione. Gli errori percentuali dello stesso sensore nella stessa campagna rispetto allo stesso sensore dell'ARPAM non sono uguali per ogni parametro misurato; NO<sub>2</sub> e O<sub>3</sub> vanno incontro a maggiori errori percentuali (in modulo), rispettivamente 853% e -98,1%. Nella campagna 2, la distanza di 60 m tra i punti in cui S1 andava a misurare, era la minore in esame. Viste le discrepanze con i sensori di riferimento dell'ARPAM, i sensori necessiteranno di una calibrazione.

Proseguendo con le conclusioni del secondo obiettivo, ovvero quello di valutare la distanza ottimale tra i punti interni alla campagna per effettuare una misurazione, possiamo affermare che, considerando la terza campagna, l'errore percentuale rispetto al sensore dell'ARPAM del Parco della Cittadella del sensore che misura a una distanza tra punti maggiore (20 metri maggiore) è sempre più grande di quello commesso dal sensore che misura in più punti e quindi in punti meno distanziati tra loro (30 metri tra un punto e l'altro). A livello numerico vediamo che per l'O<sub>3</sub> si ha un errore percentuale del 99% rispetto all'86% (entrambi in meno), per l'NO<sub>2</sub> si ha il 2714% rispetto al 377% (entrambi in più) mentre per il PM<sub>2.5</sub> si ha il 64% rispetto al 51% (entrambi in più).

Pertanto, quando si crea una campagna è bene fare in modo che le distanze tra punti di misura interni all'area di interesse siano ridotte al minimo.

Per quanto riguarda l'ultimo obiettivo, ossia quello di valutare eventuali differenze di misurazioni tra i sensori Socio-Bee in uno stesso intervallo di tempo e nello stesso spazio, analizzando la campagna 2.1 e i sensori S1 e S2 (entrambi misurano alle stesse distanze tra punti interni all'area della campagna) si nota che la media calcolata per l'NO<sub>2</sub> da S1 è 176,4 µg/m<sup>3</sup> mentre da S2 è 282,8 µg/m<sup>3</sup>. Invece, quella calcolata per il PM<sub>2.5</sub> da S1 è 13,7 µg/m<sup>3</sup> mentre da S2 è 15,7 µg/m<sup>3</sup>. Solo l'O<sub>3</sub> non ha scostamento di valore tra un sensore e l'altro. La sua media calcolata da ciascun sensore è pari a 1 µg/m<sup>3</sup>, ma comunque lontana da quella misurata come riferimento.

Avremo quindi delle differenze nelle misurazioni effettuate da diversi sensori pur considerando lo stesso intervallo di tempo e lo stesso spazio per la misurazione. Sarà necessaria una correzione per garantire gli stessi valori e garantirli nella maniera quanto più affidabile possibile.

## 5. BIBLIOGRAFIA

- [1]<https://docs.google.com/presentation/d/1LNMRMMuAPNNiDoRCx4VIMPjtVwekVbKR/edit#slide=id.p1>
- [2][https://www.salute.gov.it/imgs/C\\_17\\_paginaRelazione\\_1438\\_listaFile\\_itemName\\_2\\_file.pdf](https://www.salute.gov.it/imgs/C_17_paginaRelazione_1438_listaFile_itemName_2_file.pdf)
- [3]<https://www.arpa.piemonte.it/approfondimenti/temi-ambientali/aria/aria/cartella-qualita-episodi-acuti-di-inquinamento-da-ozono>
- [4]<https://www.arpa.umbria.it/monitoraggi/aria/contenuto.aspx?idpagina=12>
- [5]<https://www.arpa.umbria.it/monitoraggi/aria/contenuto.aspx?idpagina=13>
- [6][https://www.salute.gov.it/imgs/C\\_17\\_opuscoliPoster\\_283\\_ulterioriallegati\\_ulterioreallegato\\_2\\_alleg.pdf](https://www.salute.gov.it/imgs/C_17_opuscoliPoster_283_ulterioriallegati_ulterioreallegato_2_alleg.pdf)
- [7]<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:02008L0050-20150918&from=EN>
- [8][http://www.regione.piemonte.it/ambiente/aria/rilev/ariaday/iqa\\_pub/iqa-at/descrizioneIqa.html](http://www.regione.piemonte.it/ambiente/aria/rilev/ariaday/iqa_pub/iqa-at/descrizioneIqa.html)
- [9] Jetter, James J., et al. "Characterization of emissions from burning incense." *Science of the Total Environment* 295.1-3 (2002): 51-67.
- [10] Long K. Tran, et al. "The impact of incense burning on indoor PM2.5 concentrations in residential houses in Hanoi, Vietnam." *Building and Environment* 205 (2021), 108228
- [11]<https://www.adafruit.com/product/4632>
- [12]<https://www.pilover.com/negozio/breakout-per-la-qualita-dellaria-sensore-pmsa003i/>
- [13]<https://it.farnell.com/sharp/gp2y1010au0f/sensore-polvere-ottico/dp/9707956>
- [14][https://www.mouser.it/ProductDetail/Sharp-Microelectronics/GP2Y1014AU0F?qs=rrS6PyfT74eynj5J61tvwA%3D%3D&gclid=Cj0KCQjw06OTBhCARIsAAU1yOX5fATUvtCXgfOI5kNXwbK8\\_oCQ9kSEuSOrKb4oz0f0-XIMDz6oaApr\\_EALw\\_wcB](https://www.mouser.it/ProductDetail/Sharp-Microelectronics/GP2Y1014AU0F?qs=rrS6PyfT74eynj5J61tvwA%3D%3D&gclid=Cj0KCQjw06OTBhCARIsAAU1yOX5fATUvtCXgfOI5kNXwbK8_oCQ9kSEuSOrKb4oz0f0-XIMDz6oaApr_EALw_wcB)
- [15]<https://www.robotstore.it/Arduino-Mega-2560-R3>
- [16]<https://learn.adafruit.com/pmsa003i/arduino>
- [17]<https://projecthub.arduino.cc/>

[18][https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2022/23/e3sconf\\_roomvent2022\\_05056/e3sconf\\_roomvent2022\\_05056.html](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2022/23/e3sconf_roomvent2022_05056/e3sconf_roomvent2022_05056.html)