



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**Studio e sviluppo di un banco di misura di parametri
ambientali e qualità dell'aria**

Study and development of a bench for measuring
environmental parameters and air quality

Relatore: **Prof. Gian Marco Revel**

Candidato: **Biagio Marzano**

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

Correlatore: **Prof. Sara Casaccia**

Anno accademico 2021/2022

INDICE

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUZIONE | 5 |
| 2. MATERIALI E METODI | 7 |
| 2.1 SET-UP SPERIMENTALE | 7 |
| 2.1.1 LCS PER LA MISURA DI TEMPERATURA E UMIDITÀ | 7 |
| 2.1.2 LCS PER LA MISURA DI PM | 8 |
| 2.1.4 LCS PER LA MISURA DEI GAS | 11 |
| 2.2 METODI DI COLLEGAMENTO CON ARDUINO | 13 |
| 3. ANALISI DI INCERTEZZA | 18 |
| 4. CALIBRAZIONE SENSORI | 20 |
| 4.1 STAZIONE ARPAM | 21 |
| 5. RISULTATI | 23 |
| 5.1 MISURE INDOOR | 24 |
| 5.2. MISURE OUTDOOR | 29 |
| 6. CONCLUSIONE | 37 |
| 7. BIBLIOGRAFIA | 38 |

INDICE TABELLE

- Tabella 1.** Tabella riepilogativa del set-up sperimentale (pag. 7)
- Tabella 2.** Caratteristiche tecniche SENSORE C (pag. 8)
- Tabella 3.** Specifiche SENSORE A (pag. 9)
- Tabella 4.** Caratteristiche SENSORE B (pag. 10)
- Tabella 5.** Caratteristiche specifiche SENSORE D (pag. 11)
- Tabella 6.** Caratteristiche SENSORE E (pag. 13)
- Tabella 7.** Frequenza di campionamento sensore low-cost e Comfort Air (pag. 20)
- Tabella 8.** Frequenza di campionamento sensore low-cost e Stazione ARPAM (pag. 21)
- Tabella 9.** Specifiche del dispositivo BAM1020 (pag. 22)
- Tabella 10.** Caratteristiche SENSORE A per PM10 indoor (pag. 25)
- Tabella 11.** Caratteristiche SENSORE A per PM2.5 indoor (pag. 27)
- Tabella 12.** Caratteristiche SENSORE B per PM10 indoor (pag. 29)
- Tabella 13.** Caratteristiche SENSORE A per PM10 outdoor (pag. 31)
- Tabella 14.** Caratteristiche SENSORE A per PM2.5 outdoor (pag. 32)
- Tabella 15.** Caratteristiche SENSORE A per PM1.0 outdoor (pag. 34)
- Tabella 16.** Caratteristiche DHT22 per CO outdoor (pag. 36)

INDICE FIGURE

- Figura 1.** SENSORE C (pag. 8)
- Figura 2.** SENSORE A (pag. 10)
- Figura 3.** SENSORE B (pag. 11)
- Figura 4.** SENSORE D (pag. 12)
- Figura 5.** SENSORE E (pag. 12)
- Figura 6.** Collegamento SENSORE C ad Arduino (pag. 14)
- Figura 7.** Collegamento SENSORE A con Arduino (pag. 14)
- Figura 8.** Collegamento SENSORE B con Arduino (pag. 15)
- Figura 9.** Codice Arduino (pag. 16)
- Figura 10.** Collegamento SENSORE D con Arduino (pag. 16)
- Figura 11.** Codice Arduino (pag. 17)
- Figura 12.** Collegamento SENSORE E con Arduino (pag. 17)
- Figura 13.** Collegamento dei 5 sensori con Arduino (pag. 18)
- Figura 14.** Comfort Air (pag. 21)
- Figura 15.** BAM1020 (pag. 22)
- Figura 16.** Raffigurazione interna ed esterna della centrale di ARPAM (pag. 23)
- Figura 17.** Grafico Scatter Plot SENSORE A per PM10 indoor (pag. 24)
- Figura 18.** Grafico di confronto tra SENSORE A e Comfort Air per PM10 indoor (pag. 24)
- Figura 19.** Istogramma residui SENSORE A per PM10 indoor (pag. 25)
- Figura 20.** Grafico Scatter Plot SENSORE A per PM2.5 indoor (pag. 26)
- Figura 21.** Grafico di confronto tra SENSORE A e Comfort Air per PM2.5 indoor (pag. 26)
- Figura 22.** Istogramma residui SENSORE A per PM2.5 indoor (pag. 27)
- Figura 23.** Grafico Scatter Plot SENSORE B per PM10 indoor (pag. 28)
- Figura 24.** Grafico di confronto tra SENSORE B e Comfort Air per PM10 indoor (pag. 28)
- Figura 25.** Istogramma residui SENSORE B per PM10 indoor (pag. 29)
- Figura 26.** Grafico di confronto tra SENSORE A e Stazione ARPAM per PM10 outdoor (pag. 30)
- Figura 27.** Istogramma residui SENSORE A per PM10 outdoor (pag. 30)
- Figura 28.** Grafico di confronto tra SENSORE A e Stazione ARPAM per PM2.5 outdoor (pag. 31)
- Figura 29.** Istogramma residui SENSORE A per PM10 outdoor (pag. 32)
- Figura 30.** Grafico di confronto tra SENSORE A e Stazione ARPAM per PM1.0 outdoor (pag. 33)
- Figura 31.** Istogramma residui SENSORE A per PM1.0 outdoor (pag. 33)
- Figura 32.** Grafico di confronto tra SENSORI E e d e Stazione ARPAM per CO outdoor (pag. 34)
- Figura 33.** Istogramma residui SENSORI D ed E outdoor (pag. 35)
- Figura 34.** Grafico di confronto tra sensore DHT22 e Stazione ARPAM per RH outdoor (pag. 35)
- Figura 35.** Istogramma residui DHT22 outdoor (pag. 36)

1. INTRODUZIONE

Lo scopo di questa tesi è quello di approfondire i nuovi strumenti e le nuove tecniche per la misura ed il controllo della qualità dell'aria, valutando le performance dei sensori low-cost (LCS) in circolazione e metodi di calibrazione utilizzati.

Negli ultimi anni, sono sempre più diffusi gli LCS per la misura di qualità dell'aria. Gli LCS stanno cambiando il modo di monitorare e misurare le grandezze in tempo reale. Questi sensori sono, da come si può intuire dal nome, sensori a basso costo e possono offrire numerosi vantaggi, grazie alle loro piccole dimensioni, a livello di compattezza e di trasporto. L'utilizzo degli LCS viene utilizzato maggiormente per valutare l'inquinamento nelle varie zone delle città, grazie alla sua grandezza e alla sua capacità di poterlo posizionare dove si vuole. Tra le cause principali dell'inquinamento atmosferico troviamo l'industrializzazione, provocando un'elevata contaminazione delle aree urbane, diventando così uno dei problemi principali delle città. Non solo inquinamento, ma negli ultimi anni un fattore che sta preoccupando tutto il mondo è l'aumento della temperatura, che sta causando numerosi problemi a livello ambientale. Una delle cause principali che sta provocando l'aumento di temperatura è il gas serra, e dunque l'aumento dell'effetto serra, dato proprio dall'incessante attività umana e industriale [23].

Gli LCS permettono di realizzare delle stazioni di monitoraggio mobili che misurano il livello degli inquinanti offrendo una elevata risoluzione spaziale e temporale. Inoltre, un ulteriore aspetto positivo degli LCS è quello di permettere di registrare un numero molto elevato di dati, rispetto alle stazioni fisse; basti pensare che la stazione fissa ARPAM (Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale) fornisce dati ogni ora, mentre i sensori che verranno analizzati permettono di visionare dati ogni minuto. Uno svantaggio degli LCS è l'incertezza elevata, influenzata dalle condizioni ambientali che la circondano e possono avere problemi di cross-sensitivity, dovuta al fatto che il sensore per la misura di una tipologia di gas potrebbe essere influenzato dalla presenza di un altro gas, fornendo misurazioni sbagliate; ed è proprio per questo motivo che richiedono calibrazioni più frequenti, perché possiedono un'incertezza elevata condizionata dai fattori esterni. Dal punto di vista dell'analisi dei dati, la qualità dei risultati è una delle principali preoccupazioni poiché i dati di bassa qualità portano più spesso a una scarsa fiducia nei sistemi di monitoraggio [1].

Avere un'incertezza molto elevata rende gli LCS poco attendibili, soprattutto quelli che costano pochi euro. Questo tipo di sensori devono quindi essere calibrati per poter mantenere delle performance accettabili. Dunque, si può affermare che nonostante la semplicità e il basso costo che hanno gli LCS, rispetto alle stazioni fisse avremo nella maggior parte dei casi incertezze molto grandi, rendendoli poco adatti per le misure molto accurate e precise. Pertanto, spesso vengono scelte le stazioni fisse per avere misure corrette e

precise, nonostante lo svantaggio della stazionarietà, che non permette di ottenere misure dove si desidera. Una buona parte di questi sensori 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 gran parte delle zone italiane [2].

La calibrazione del sensore di qualità dell'aria è il processo di correzione o regolazione delle misurazioni del sensore mediante giustapposizione con una concentrazione nota/di riferimento dei parametri. Gli LCS in grado di monitorare un'ampia gamma di parametri dell'aria ambiente. Questi includono anidride carbonica, composti organici volatili (COV), particolato e anidride solforosa tra gli altri. Tuttavia, un solido quadro di procedure di calibrazione precede la distribuzione. Questo si concentra sul miglioramento della precisione del sensore attraverso molteplici test in laboratorio e sul luogo di installazione. La calibrazione è una parte essenziale del controllo di qualità dei sensori in quanto aiuta a identificare ed eliminare le deviazioni dei dati.

I sensori a basso costo sono facili da installare e funzionano su larga scala. I risultati suggeriscono che, oltre a essere in grado di produrre letture estremamente precise, l'affidabilità complessiva di questi sensori è soggetta a una calibrazione tempestiva. L'umidità relativa e la temperatura dell'area di installazione interferiscono con le misurazioni. Ciò, a sua volta, potrebbe portare a un aumento o a una diminuzione fuorvianti delle tendenze dell'inquinamento [19].

Questo lavoro di tesi è quindi iniziato con un'analisi della letteratura per raccogliere informazioni sui sensori utilizzati per la misura della concentrazione di inquinanti (particolato e gas) quali particolato aerodisperso (PM) e Monossido di Carbonio (CO). Altri due parametri analizzati sono temperatura e umidità, che, come citato precedentemente, possono generare incertezza di misura.

L'obiettivo del progetto è stato quello di sviluppare una procedura di calibrazione dei sensori utilizzando come riferimento le stazioni di monitoraggio, come ad esempio ARPAM, per le misure outdoor; mentre, per le misure indoor come riferimento viene utilizzato il Comfort Air. Un altro punto fondamentale è quello di esaminare la differenza fra l'incertezza di misura dei sensori in ambiente outdoor e indoor. Tale esperienza ha consentito di evidenziare potenzialità e difetti di questi sensori, che nella loro economicità e semplicità d'uso, saranno probabilmente più diffusi e utilizzati dalla popolazione.

2. MATERIALI E METODI

2.1 SET-UP SPERIMENTALE

Negli ultimi anni si sono diffusi diversi tipi di sensori a basso costo per la determinazione di inquinanti atmosferici. Nel corso del tempo gli LCS si sono evoluti, mantenendo comunque dei risultati diversi rispetto alle stazioni fisse di riferimento. Nel vasto mercato degli LCS troviamo una varietà di sensori che misurano numerosi parametri, come ad esempio: PM, gas, temperatura e umidità.

Lo scopo di questo progetto è quello di poter confrontare i sensori che misurano gli stessi parametri, per poi poter calcolare l'incertezza di misura e valutarne l'utilizzo. I sensori che sono stati analizzati in questo progetto misurano: PM, gas (CO), temperatura e umidità. Questi sono: GP2Y101AUOF e PMSA003I, che sono sensori che misurano il PM; MICS-2714 e MICS4527, che misurano la CO; infine, DHT22, che misura temperatura e umidità. Nei prossimi capitoli saranno riportate le caratteristiche di ogni sensore.

Nella seguente tabella (**Tabella 1**) sono schematizzati in maniera semplificata cosa misurano i sensori, con annesso costo di mercato:

| <i>NOME</i> | <i>SENSORI</i> | <i>PM10</i> | <i>PM2.5</i> | <i>PM1.0</i> | <i>CO</i> | <i>RH</i> | <i>T</i> | <i>COSTO</i> |
|-------------|----------------|-------------|--------------|--------------|-----------|-----------|----------|--------------|
| PMSA003I | SENSORE A | X | X | X | | | | 69,90€ |
| GP2Y101AUOF | SENSORE B | X | | | | | | 7,80€ |
| DHT22 | SENSORE C | | | | | X | X | 10,00€ |
| MICS-2714 | SENSORE D | | | | X | | | 37,50€ |
| MICS-4514 | SENSORE E | | | | X | | | 12,20€ |

Tabella1. Tabella riepilogativa del set-up sperimentale

2.1.1 LCS PER LA MISURA DI TEMPERATURA E UMIDITÀ

Il DHT22 (SENSORE C) è il sensore che misura temperatura e umidità. Il SENSORE C (**Figura 1**) è montato sulla scheda composto da un elemento capacitivo per la misura dell'umidità e da una NTC, ovvero un sensore di temperatura basato su semiconduttori della famiglia dei termistori [7]. Il prezzo di questo sensore si aggira sui 10,00€, in base all'andamento di

mercato.

Di seguito si riportano le caratteristiche tecniche del sensore citato (**Tabella 2**):

| | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| ACCURATEZZA (RH) | $\pm 2\%$ |
| SENSIBILITA (RH) | 0,1% |
| ACCURATEZZA (T) | $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ |
| SENSIBILITA (T) | 0,1 $^{\circ}\text{C}$ |
| ALIMENTAZIONE | 3,3VCC-6VCC |
| GAMMA DI MISURA UMIDITA | 0-100% RH |
| GAMMA DI MISURA TEMPERATURA | -40/80 $^{\circ}\text{C}$ |
| PRECISIONE PER LA MISURA DI RH | $\pm 2\%$ RH |
| PRECISIONE PER LA MISURA DI T | $\pm 0,2\%$ $^{\circ}\text{C}$ |

Tabella 2. Caratteristiche tecniche SENSORE C



Figura 1. SENSORE C

2.1.2 LCS PER LA MISURA DI PM

In questa parte vengono analizzati due sensori per il particolato, che sono: il PMSA003I e il GP2Y101AUOF. In seguito vengono analizzati singolarmente.

- Il PMSA003I (SENSORE A) consiste in un sensore della qualità dell'aria. Il SENSORE A (**Figura 2**) si presenta con un formato compatto. Ha un'interfaccia I2C per cui può essere usato con i computer Linux, quale ad esempio Raspberry Pi o anche con Arduino UNO. 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 ed anche 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 fornendoti:

- La concentrazione di PM1.0, PM2.5 e PM10.0 sia in unità standard che ambientali
- Particolato per 0.1L di aria, classificato in contenitori di dimensioni 0.3µm, 0.5µm, 1.0µm, 2.5µm, 5.0µm e 10µm

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, quindi è possibile alimentarlo da 3.3 a 5V[7]. Il costo del sensore è di 69,90€. Le specifiche del sensore sono riportate nella seguente tabella (**Tabella 3**) [6]:

| | |
|---------------------------------------|------------------------|
| RISOLUZIONE DELLE PARTICELLE | 1µg/m ³ |
| VOLUME STANDARD DELLE PARTICELLE | 0,1 L |
| TEMPO DI SINGOLA RISPOSTA | <1 sec |
| TEMPO DI RISPOSTA TOTALE | ≤10 sec |
| TIPO DI ALIMENTAZIONE | 5,0V MIN:4,5V MAX:5,5V |
| RANGE DI TEMPERATURA DI FUNZIONAMENTO | -10/60 °C |
| RANGE DI UMIDITA DI FUNZIONAMENTO | 0/99% |
| RANGE DI TEMPERATURA DI STOCCAGGIO | -40/80 °C |

Tabella 3. Specifiche SENSORE A



Figura 2. SENSORE A

- Il sensore Sharp GP2Y1010AU0F (SENSORE B) (**Figura 3**) è un sensore di polvere con sistema di rilevamento ottico. Questo dispositivo presenta un diodo emettitore a infrarossi (IRED) e un fototransistor disposti in senso diagonale, 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. Viene utilizzata soprattutto in ambito industriale, elettronica di consumo, dispositivi portatili, rilevamento e strumentazione [9]. Il prezzo di questo sensore è di 7,80€.

Le caratteristiche tecniche di questo sensore sono riportate di seguito (**Tabella 4**) [8]:

| | |
|-------------------------------------|--------------------------------|
| TEMPERATURA DI LAVORO MASSIMA | +65°C |
| TEMPERATURA DI LAVORO MINIMA | -10°C |
| TENSIONE DI ALIMENTAZIONE DI LAVORO | 5V |
| TENSIONE IN USCITA | 0,6V |
| SENSIBILITA | 0.5 V/(100 µg/m ³) |
| TENSIONE DI ALIMENTAZIONE MAX | 5,5V |
| TENSIONE DI ALIMENTAZIONE MIN | 4,5V |
| PESO UNITA | 17 g |

Tabella 4. Caratteristiche SENSORE B



Figura 3. SENSORE B

2.1.4 LCS PER LA MISURA DEI GAS

In questo lavoro di tesi, sono stati scelti due LCS per la misura della concentrazione di gas. I due sensori sono: MICS-2714 e MICS-4514.

- Il sensore MICS-2714 (SENSORE D) (**Figura 4**) utilizza la tecnologia MEMS per supportare il rilevamento della concentrazione di gas di CO. Il codice campione corrispondente integra la formula di conversione della concentrazione del gas per facilitare il test e l'uso dei sensori. Il prodotto supporta alimentazione a 5 V, uscita di tensione analogica e dispone di pin di abilitazione/disabilitazione dell'alimentazione per un basso consumo energetico [3]. Il costo di questo sensore è di 12,10€.

Le caratteristiche di questo sensore sono esplicitate nella seguente tabella (**Tabella 5**):

| | |
|---------------------------------|----------|
| MASSIMA TEMPERATURA PER OPERARE | +85 °C |
| MINIMA TEMPERATURA PER OPERARE | -30 °C |
| RANGE DI MISURA UMIDITA | 5/9 % RH |
| SENSIBILITA TEMPERATURA | ±5 °C |
| SENSIBILITA UMIDITA | 10% RH |

Tabella 5. Caratteristiche specifiche SENSORE D

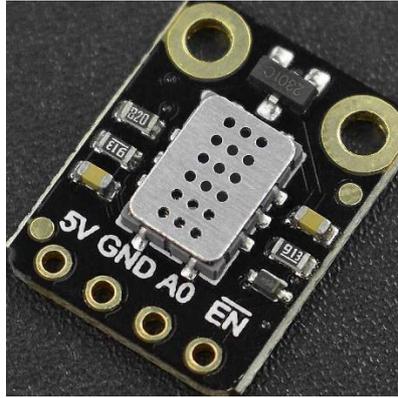


Figura 4. SENSORE D

- Il MICS-4514 (SENSORE E) (**Figura 5**) viene utilizzato per il rilevamento di varie concentrazioni di gas come CO, C₂H₅OH (Alcool), H₂, NO₂, NH₃, il dato in uscita è disponibile su interfaccia I2C. Il SENSORE E integra varie formule di conversione della concentrazione di gas che permettono l'utilizzo del sensore in modo semplice e rapido. L'alimentazione è compresa tra 3,3Vcc e 5,5Vcc rendendo possibile l'utilizzo con Arduino, con ESP32, con Raspberry Pi e altri controller tradizionali. Permette il rilevamento di gas nocivi e inoltre utilizza un basso consumo energetico [4].



Figura 5. SENSORE E

Nella successiva tabella sono state riportate le caratteristiche di questo sensore low-cost (**Tabella 6**):

| | |
|------------------------------|--|
| RILEVAMENTO CONCENTRAZIONE | CO, C ₂ H ₅ OH(ALCOOL), H ₂ , NO ₂ , NH ₃ |
| ALIMENTAZIONE | 3,3Vcc – 5Vcc |
| TEMPO DI PRERISCALDAMENTO | 3min |
| TEMPERATURA DI FUNZIONAMENTO | -30/85 |
| CAMPO DI MISURA CO | 1ppm-1000ppm |
| CAMPO DI MISURA NO2 | 0.05ppm-10ppm |
| CAMPO DI MISURA C2H5OH | 10ppm-500ppm |
| CAMPO DI MISURA H2 | 1ppm-1000ppm |
| CAMPO DI MISURA NH3 | 1ppm-500ppm |
| CAMPO DI MISURA CH4 | >1000ppm |

Tabella 6. Caratteristiche SENSORE E

2.2 METODI DI COLLEGAMENTO CON ARDUINO

In questa sezione viene illustrato come ogni sensore viene collegato ad Arduino singolarmente; nell'ultima parte, invece, viene mostrato come i cinque sensori sono collegati ad una singola scheda di Arduino . La connessione con Arduino viene effettuata attraverso l'utilizzo dei jumper. Una volta compiuto il collegamento e collegata la scheda al computer, si ricevono sul pc i dati che misurano i sensori.

Nei paragrafi successivi sono raffigurati e descritti come i sensori sono stati messi in contatto con Arduino:

- **SENSORE C:** I collegamenti sono: il pin GND con la massa dell'Arduino UNO (GND); il pin VCC con il pin 5V dell'Arduino; infine il pin DAT ad uno dei pin digitali dell'Arduino, in questo caso viene utilizzato il pin 8. Una volta effettuato il collegamento come in **Figura 6** e collegata la scheda di Arduino al computer, tramite l'applicazione di Arduino si è in grado di ricevere dati ogni minuto di temperatura e umidità [13].

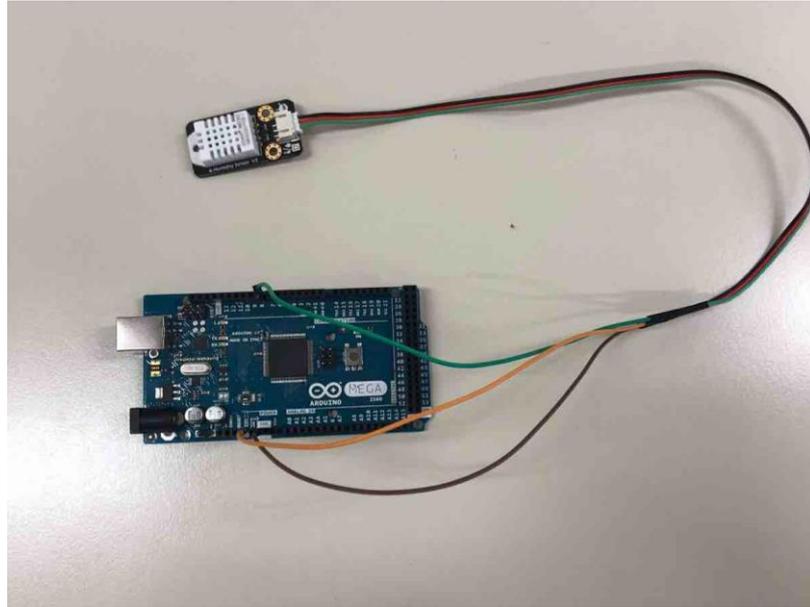


Figura 6. Collegamento SENSORE C ad Arduino

- SENSORE A: I collegamenti di questo sensore con Arduino sono: il pin GND con la massa dell'Arduino UNO (GND); il pin VCC con il pin 5V dell'Arduino; SDA del sensore con l'SDA dell'Arduino; SCL del sensore con quello dell'Arduino. I collegamenti elencati sopra sono raffigurati nell'immagine seguente (**Figura 7**) [14].

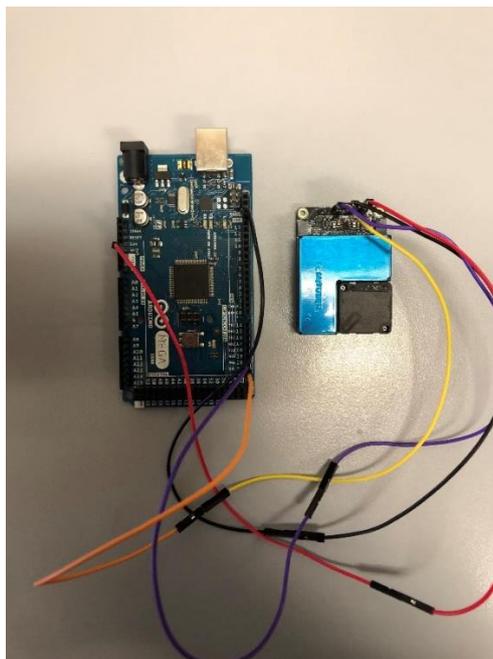


Figura 7. Collegamento SENSORE A con Arduino

- **SENSORE B:** Il collegamento di questo sensore è: il pin GND con la massa dell'Arduino UNO (GND); il pin VCC con il pin 5V dell'Arduino; infine AOUT del sensore con il PWM7. Una volta che si è collegato in maniera corretta, il procedimento per ottenere le misurazioni è uguale ai sensori precedenti [17].

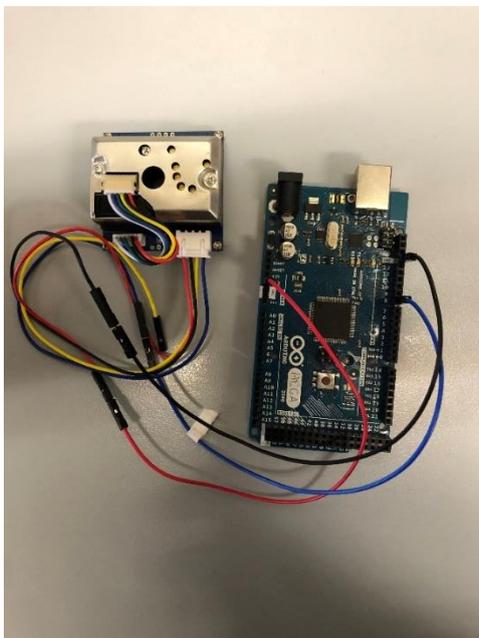


Figura 8. Collegamento SENSORE B con Arduino

- **SENSORE D :** I collegamenti del sensore D con la scheda di Arduino sono: il pin GND con la massa dell'Arduino UNO (GND); il pin VCC con il pin 5V dell'Arduino; il pin DAT ad uno dei pin digitali dell'Arduino, in questo caso è stato utilizzato il pin 8; infine il V0 è stato collegato il A0. Il sensore permette di rilevare CH₄, C₃H₅OH, H₂, CO, NO₂; ma il gas che è stato esaminato in questo progetto è CO. Nella figura seguente (**Figura 9**) è stato riportato una parte del codice di Arduino, dove cambiando il contenuto all'interno della parentesi (indicato dalla freccia), possiamo rilevare il gas che si vuole tra quelli citati sopra. Nella **Figura 10** è raffigurato il metodo di collegamento di questo sensore [15].

```

void loop()
{
  /**!
  Gas type:
  MICS-4514 You can get all gas concentration
  MICS-5524 You can get the concentration of CH4, C2H5OH, H2, NH3, CO
  MICS-2714 You can get the concentration of NO2
  Methane      (CH4)    (1000 - 25000)PPM
  Ethanol      (C2H5OH) (10 - 500)PPM
  Hydrogen     (H2)     (1 - 1000)PPM
  Ammonia      (NH3)    (1 - 500)PPM
  Carbon Monoxide (CO)  (1 - 1000)PPM
  Nitrogen Dioxide (NO2) (0.1 - 10)PPM
  */
  float gasdata = mics.getGasData(NO2);
  Serial.print(gasdata);
  Serial.println(" PPM ");
  delay(1000);
  //mics.sleepMode();
}

```

Figura 9. Codice Arduino

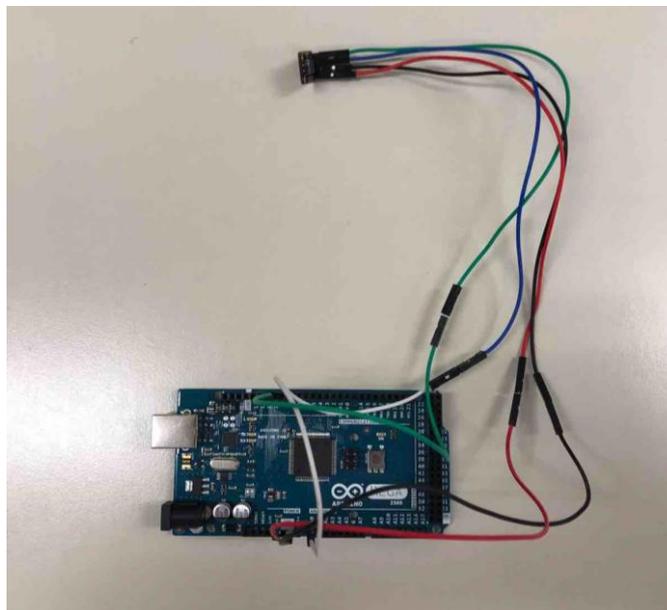


Figura 10. Collegamento SENSORE D ad Arduino

- **SENSORE E:** I collegamenti sono: il pin GND con la massa dell'Arduino UNO (GND); il pin VCC con il pin 5V dell'Arduino; SCL in A5; per concludere SDA in A4. A seguire, il procedimento è simile a quello precedente [16].

```

void loop()
{
  /**!
  Gas type:
  MICS-4514 You can get all gas concentration
  MICS-5524 You can get the concentration of CH4, C2H5OH, H2, NH3, CO
  MICS-2714 You can get the concentration of NO2
  Methane      (CH4)  (1000 - 25000) PPM
  Ethanol      (C2H5OH) (10 - 500) PPM
  Hydrogen     (H2)   (1 - 1000) PPM
  Ammonia     (NH3)  (1 - 500) PPM
  Carbon Monoxide (CO) (1 - 1000) PPM
  Nitrogen Dioxide (NO2) (0.1 - 10) PPM
  */
  float gasdata = mics.getGasData(C2H5OH);
  Serial.print(gasdata,1);
  Serial.println(" PPM");
  delay(1000);
  //mics.sleepMode();
}

```



Figura 11. Codice Arduino

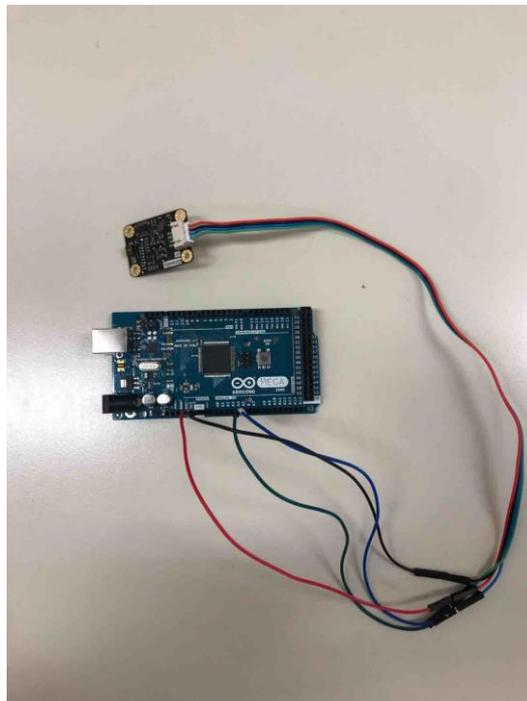


Figura 12. Collegamento SENSORE E con Arduino

- COLLEGAMENTO DEI 5 SENSORI CON ARDUINO: in questa ultima sezione viene presentato come i 5 sensori sono stati collegati contemporaneamente ad Arduino. Per il voltaggio è stata utilizzata un board, in quanto Arduino non possiede più di un voltaggio da 5V. Il resto dei jumper sono stati inseriti negli appositi pin, seguendo le indicazioni dei paragrafi precedenti.

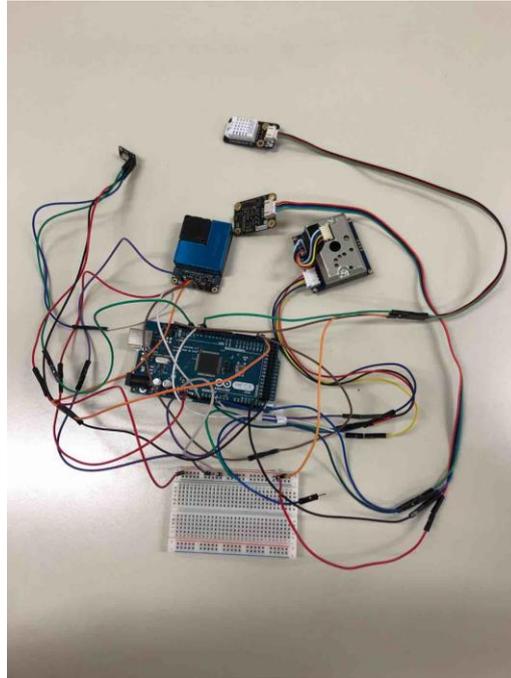


Figura 13. Collegamento dei 5 sensori con Arduino

3. ANALISI DI INCERTEZZA

I parametri che verranno analizzati successivamente servono per calcolare l'incertezza di misura degli LCS rispetto al metodo di riferimento scelto. I parametri sono i seguenti: incertezza della misura d'ingresso, incertezza della misura d'uscita, deviazione standard, retta di regressione e media dei residui. I risultati derivanti da questi criteri di misura permettono di analizzare i grafici con maggior facilità.

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 q_i e q_o e che esse sono legate da una relazione lineare (retta dei minimi quadrati):

$$q_o = m q_i + b \quad (1)$$

dove m sta ad indicare la sensibilità dello strumento, mentre b è l'ordinata all'origine.

Per la generica coppia (q_{ik}, q_{ok}) la deviazione del valore di q_{ok} calcolato usando la retta $(m q_{ik} + b)$ e il valore misurato sarà

$$d_k = m q_{ik} + b - q_{ok} \quad (2)$$

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:

$$\sum_{i=1}^N d_k^2 = \sum_{i=1}^N (mq_{ik} + b - q_{ok})^2 \quad (3)$$

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

L'analisi di regressione mi permette di determinare:

$$m = \frac{N \sum_i q_i q_o - (\sum q_i)(\sum q_o)}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2} \quad (4)$$

$$b = \frac{(\sum q_o)(\sum q_i^2) - (\sum q_i q_o)(\sum q_i)}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2} \quad (5)$$

Una volta calcolato il valore di q_o dalla retta così determinata si può determinare il suo scostamento dal valore q_o misurato ovvero la sua varianza

$$S_{q_o}^2 = \frac{1}{N} \sum (mq_i + b - q_o)^2 \quad (6)$$

E lo stesso si può fare per q_i :

$$S_{q_i}^2 = \frac{S_{q_o}^2}{m^2} \quad (7)$$

Pertanto è possibile determinare l'incertezza sulla misura dell'ingresso e su quella di uscita.

$$S_{q_o} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (mq_i + b - q_o)^2} \quad (8)$$

$$S_{q_i} = \frac{S_{q_o}}{m} \quad (9)$$

Gli altri due parametri che sono stati analizzati sono: deviazione standard (11) e media dei residui (12)

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (10)$$

$$\text{media} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (11)$$

4. CALIBRAZIONE SENSORI

Esistono due tipi di approccio principale per calibrare un sensore. Il primo consiste nel fare una calibrazione con qualche “standard”, per cui si introduce uno standard ampiamente accettato dal sensore. La seconda opzione, ovvero quella che viene eseguita in questo progetto, è quella di fare un confronto con uno ‘strumento di riferimento’ che è stato già calibrato con uno standard riconosciuto. Questo secondo approccio è in genere definito “collocazione”. Si decide di collocare il proprio sensore accanto ad uno di quelli ufficiali, posizionando entrambi i sensori affianco alla centralina dell’aria, in modo che entrambi captano la stessa aria [18].

L'obiettivo di questa tesi è quello calcolare l’incertezza di misura dei cinque sensori presi in considerazione. Per compiere questo lavoro sono stati posti i nostri sensori accanto a quelli di riferimento e sono stati confrontati ed analizzati i dati misurati.

Le misure sono state effettuate sia indoor che outdoor, per circa due settimane di misurazioni. I rilevamenti indoor sono stati fatti nella sede dell’Università, nell’ufficio di lavoro; mentre, le misure outdoor sono state eseguite a Cittadella di Ancona, dove è presente la stazione ARPAM (Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale Marche), utilizzata come stazione di riferimento per le nostre misurazioni. Il riferimento per le misure indoor è il Comfort Air (**Figura 14**), un prototipo interno già calibrato, utilizzato per fornire misure accurate e quindi con molta affidabilità.

Il Comfort Air misura PM2.5 e PM10, quindi per i rilevamenti indoor sono stati calibrati i due sensori di PM (SENSORE A e SENSORE B). Invece, la stazione di riferimento situata a Cittadella fornisce i dati per tutte le grandezze che misurano i sensori (PM10, PM2.5, PM1.0, CO, RH). Un aspetto da tenere in considerazione è la frequenza di campionamento. I sensori low-cost misurano dati ogni minuto, proprio come il Comfort Air (**Tabella 7**); mentre, la Stazione ARPAM misura dati ogni ora (**Tabella 8**).

| | <u>FREQUENZA DI CAMPIONAMENTO</u> |
|-------------------------|-----------------------------------|
| <u>Sensore low-cost</u> | 1 minuto |
| <u>Comfort Air</u> | 1 minuto |

Tabella 7. Frequenza di campionamento sensore low-cost e Comfort Air

| | <u>FREQUENZA DI CAMPIONAMENTO</u> |
|-------------------------|-----------------------------------|
| <u>Sensore low-cost</u> | 1 minuto |
| <u>Stazione ARPAM</u> | 1 ora |

Tabella 8. Frequenza di campionamento sensore low-cost e Stazione ARPAM



Figura 14. Comfort Air

4.1 STAZIONE ARPAM

L'ARPAM (agenzia regionale per la protezione ambientale) si articola in una Struttura Centrale, sita in Ancona, e Dipartimenti Provinciali, siti nei cinque capoluoghi di provincia che costituiscono la rete tecnico-scientifica dell'Agenzia ed esercitano funzioni operative tramite la loro articolazione in Servizi Territoriali e Tecnici, a loro volta suddivisi in Unità Operative.

L'Agenzia regionale per la protezione ambientale delle Marche è stata istituita con la legge regionale 2 settembre 1997 n. 60 quale ente di diritto pubblico, con autonomia tecnico-scientifica, amministrativa e contabile, per il supporto tecnico-scientifico alla Regione e agli Enti locali nelle materie d'interesse ambientale.

Il supporto tecnico scientifico coinvolge numerose materie d'interesse ambientale, quali: la bonifica dei suoli inquinati, la tutela dell'acqua e dell'aria, il ciclo dei rifiuti, la difesa dalle nuove forme d'inquinamento (acustico, luminoso, elettromagnetico), impegnando l'agenzia

sotto i profili della redazione di pareri, del monitoraggio sullo stato dell'ambiente, della prevenzione, della vigilanza e del controllo.

La principale fonte da cui traggono origine le suddette attività è rappresentata da norme di legge che indicano espressamente l'ARPAM quale soggetto di riferimento per gli enti pubblici nella loro opera amministrativa di governo del territorio, nonché di custodia della qualità dell'ambiente [20].

La stazione ARPAM (**Figura 16**) misura caratteristiche come: Monossido di Carbonio, attraverso il dispositivo TE48C; polveri PM10, PM2.5, PM1.0, grazie al dispositivo BAM1020; infine, temperatura e umidità.

Il BAM 1020 misura e registra automaticamente i livelli di concentrazione di particolato aereo (in milligrammi o microgrammi per metro cubo) utilizzando il principio collaudato nel settore dell'attenuazione dei raggi beta. Migliaia di unità BAM 1020 sono attualmente impiegate in tutto il mondo, rendendo l'unità una delle piattaforme di monitoraggio aereo di maggior successo al mondo [21].



Figura 15. BAM1020

Nella tabella (**Tabella9**) successiva vengono mostrate le caratteristiche tecniche di questo strumento [22]:

| | |
|--------------------------------------|-------------------------|
| Tempo ciclo di misurazione | 1 h |
| Range di temperatura di operazione | 0° / +50°C |
| Range di umidità | 0 / 90% RH |
| Portata | 16.70 L/min |
| Limite di rilevamento inferiore (1h) | < 4.8 µg/m ³ |

Tabella 9. Specifiche del dispositivo BAM1020



Figura 16. Raffigurazione interna ed esterna della centrale di ARPAM

5. RISULTATI

In questa sezione sono raffigurate e analizzati i grafici per la calibrazione del sensore. Vengono analizzati i parametri prima citati (**Cap.3**), confrontando i nostri sensori low-cost con l'apposito riferimento, a seconda se sia indoor o outdoor.

I grafici che vengono riportati raffigurano: lo scatter plot tra riferimento (Comfort Air o Stazione ARPAM) e il sensore LCS; un grafico per esaminare i trend a confronto; infine, l'istogramma dei residui.

Dai grafici ottenuti si può dedurre quale tra i sensori PM a disposizione e quale tra i sensori di concentrazione di gas è più affidabile riuscendo ad esaminare il trend e l'incertezza di misura. Lo stesso lavoro viene effettuato per il sensore DHT22.

5.1 MISURE INDOOR

Per le misure indoor sono stati analizzati due tipi di sensori, il SENSORE A e il SENSORE B. Come già citato precedentemente questi due LCS misurano la PM ed il sensore di riferimento per le misure indoor è il Comfort Air. Il SENSORE A misura due parametri: PM10 e PM2.5. Mentre il SENSORE B solo la PM10. I successivi grafici raffigurano gli andamenti di questi due sensori:

- **SENSORE A PER LA MISURA DI PM10 INDOOR**

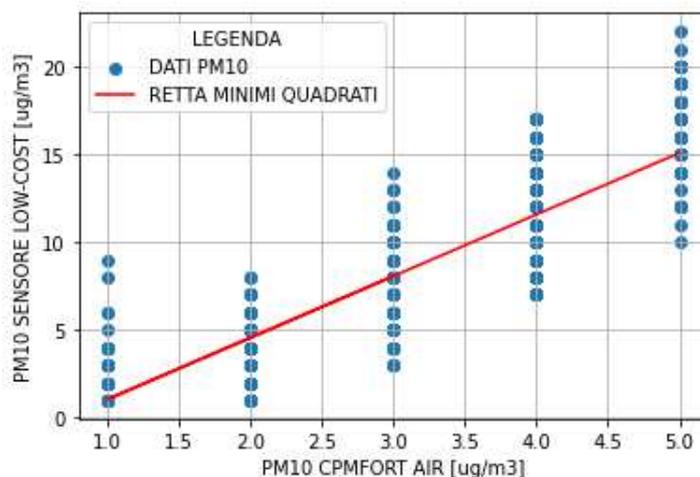


Figura 17. Grafico Scatter Plot SENSORE A per PM10 indoor

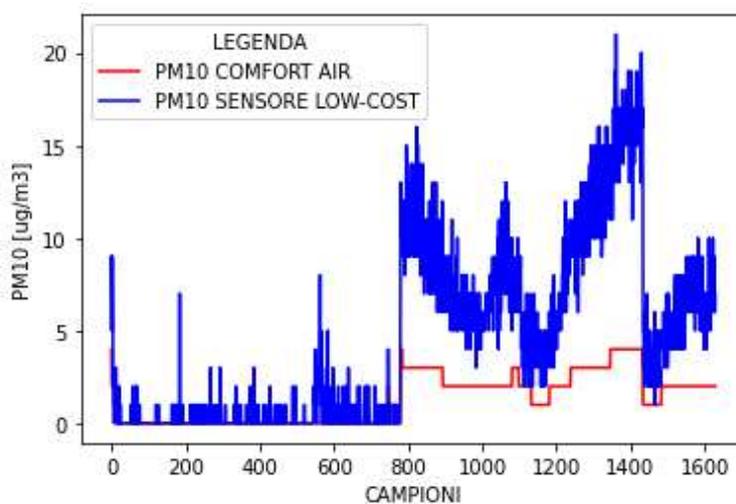


Figura 18. Grafico di confronto tra SENSORE A e Comfort Air per PM10 indoor

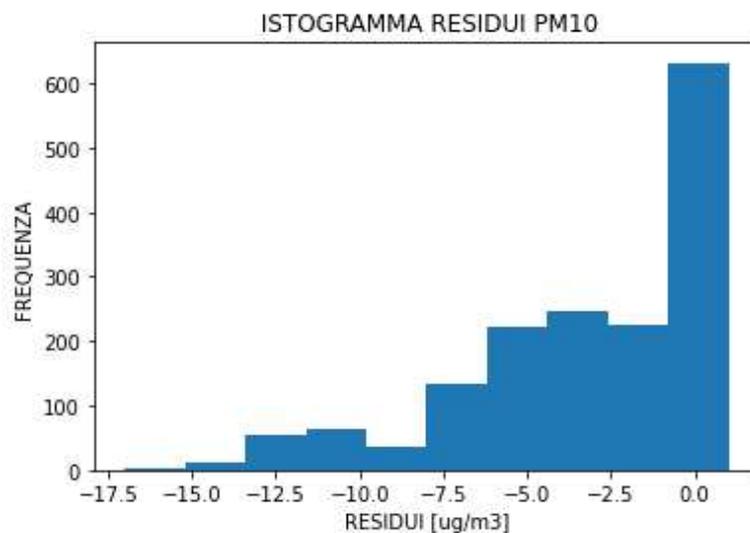


Figura 19. Istogramma residui SENSORE A per PM10 indoor

| CARATTERISTICHE PM10 | VALORE |
|--|-----------------------------------|
| Equazione retta regressione | $y=3,5x-2,5$ |
| Media residui \pm deviazione standard (σ) | $2,3 \pm 3,7$ |
| $2 * S_{qi}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | $2 * 0,47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| $2 * S_{qi}$ (%) | 41,6% |

Tabella 10. Caratteristiche SENSORE A per PM10 indoor

Dai risultati e i grafici ottenuti si può notare che l'incertezza del sensore low-cost è abbastanza alta, del 41,6%. Ottenere dati con questa incertezza si può affermare che il sensore non è molto attendibile, nonostante il suo prezzo molto elevato per essere un sensore di basso costo. Nella **Figura 18** il sensore low-cost a tratti segue il trend del Comfort Air, avendo comunque una variabilità molto più marcata, che si può notare poi nell'incertezza finale percentuale.

- **SENSORE A PER LA MISURA DI PM2.5 INDOOR**

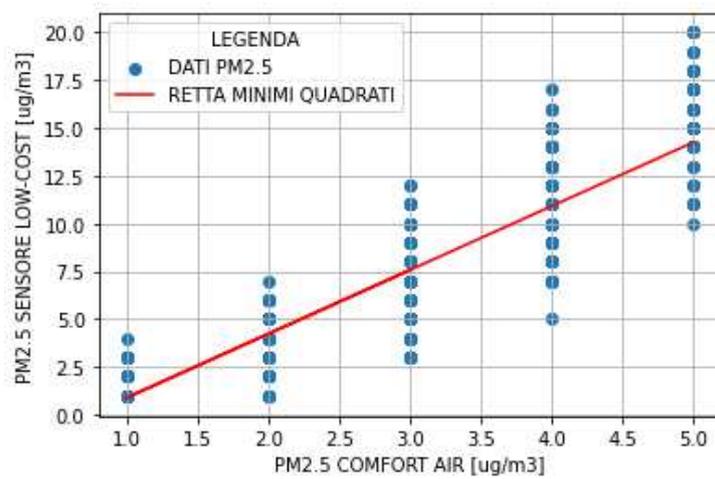


Figura 20. Grafico Scatter Plot SENSORE A per PM2.5 indoor

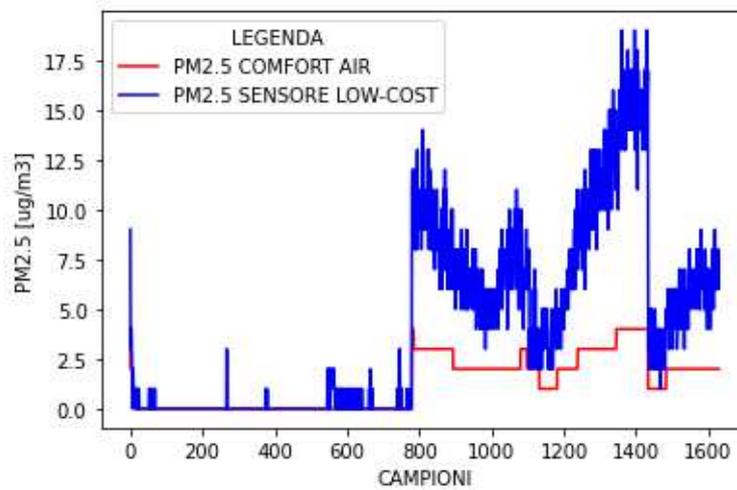


Figura 21. Grafico di confronto tra SENSORE A e Comfort Air per PM2.5 indoor

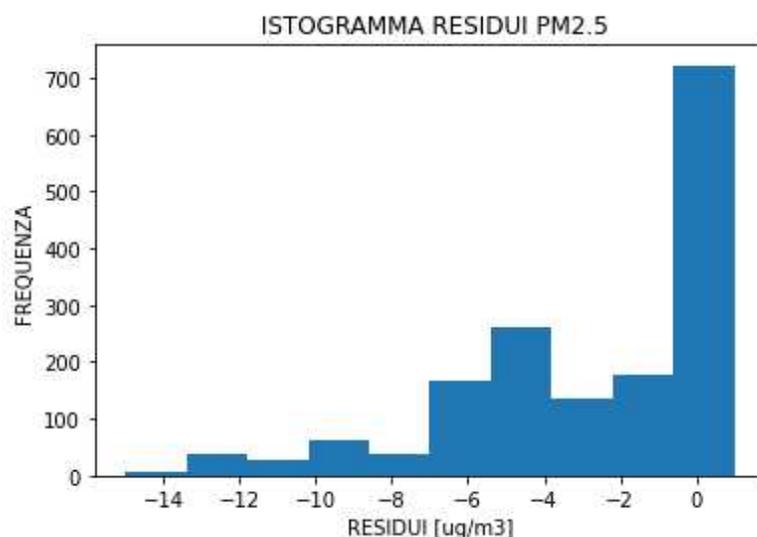


Figura 22. Istogramma residui SENSORE A per PM2.5 indoor

| CARATTERISTICHE PM2.5 | VALORE |
|--|-----------------------------------|
| Equazione retta regressione | $y=3,3x-2,5$ |
| Media residui \pm deviazione standard (σ) | $2,6 \pm 3.4$ |
| $2 * S_{qi}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | $2 * 0,42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| $2 * S_{qi}$ (%) | 37,8% |

Tabella 11. Caratteristiche SENSORE A per PM2.5 indoor

I risultati e i grafici ottenuti per la misura indoor del PM2.5 del SENSORE A sono simili a quelli precedenti. L'andamento del sensore low-cost è abbastanza diverso e variabile rispetto ai risultati del sensore di riferimento, anche se il trend in alcuni tratti è quasi lo stesso. L'incertezza finale è di 37,8%, minore rispetto a quella di PM10, però rimane abbastanza alta per essere un sensore di misure precise.

- **SENSORE B PER LA MISURA DI PM10 INDOOR**

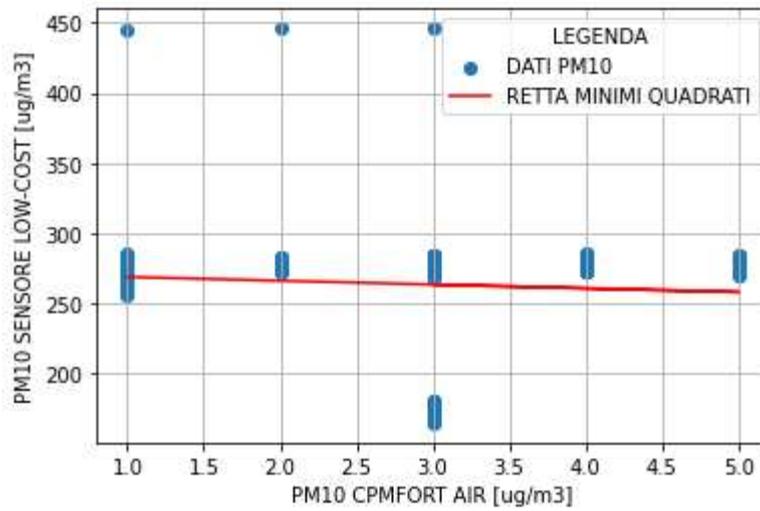


Figura 23. Grafico Scatter Plot SENSORE B per PM10 indoor

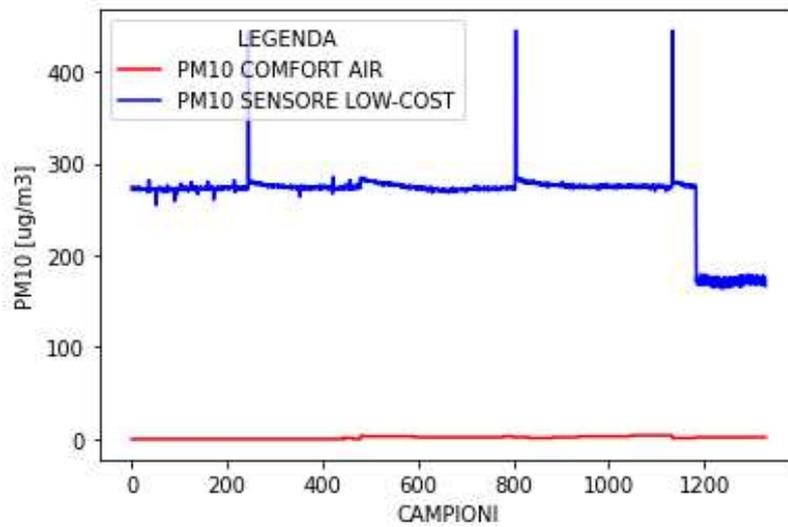


Figura 24. Grafico di confronto tra SENSORE B e Comfort Air per PM10 indoor

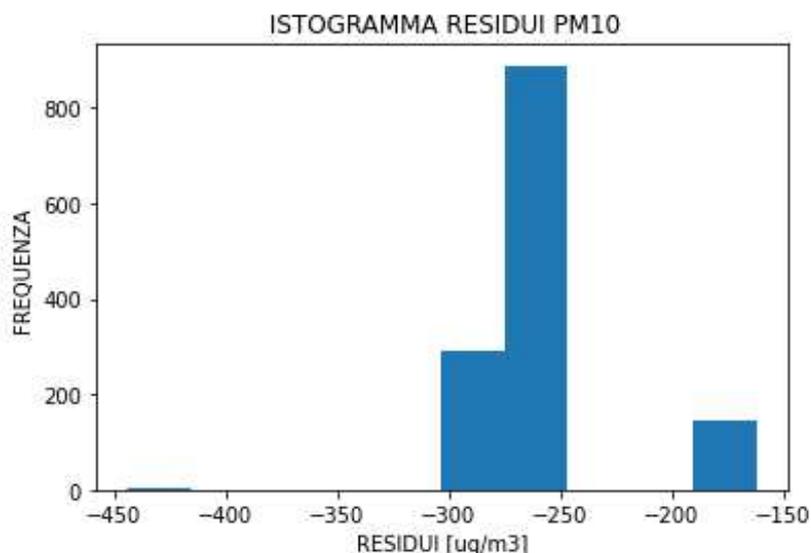


Figura 25. Istogramma residui SENSORE B per PM10 indoor

| CARATTERISTICHE PM10 | VALORE |
|--|-----------------------------------|
| Equazione retta regressione | $y = -2,7x + 271,7$ |
| Media residui \pm deviazione standard (σ) | $2,5 \pm 33,3$ |
| $2 * S_{qi}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | $2 * 12,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| $2 * S_{qi}$ (%) | 962% |

Tabella12. Caratteristiche SENSORE B per PM10 indoor

Il SENSORE B da come si può notare nei grafici e nella tabella (**Tabella 12**) possiede un andamento e i risultati completamente diversi rispetto a quello di riferimento. Si può evidenziare che l'incertezza finale percentuale è di ben 962%, di conseguenza si afferma che questo tipo di sensore è poco attendibile ed affidabile. La differenza con l'altro sensore è marcata, questo è dato anche dal fatto che i costi son ben diversi tra di loro; infatti, il SENSORE B costa pochi euro.

5.2. MISURE OUTDOOR

Le misure outdoor, a differenza di quelle indoor, misurano un numero più elevato di parametri, che sono: PM10, PM2.5, PM1.0, CO, RH. Il riferimento utilizzato per questo tipo di misurazioni è la stazione ARPAM. Successivamente sono riportati i grafici degli LCS per le misure outdoor:

- **SENSORE A PER LA MISURA DI PM10 OUTDOOR**

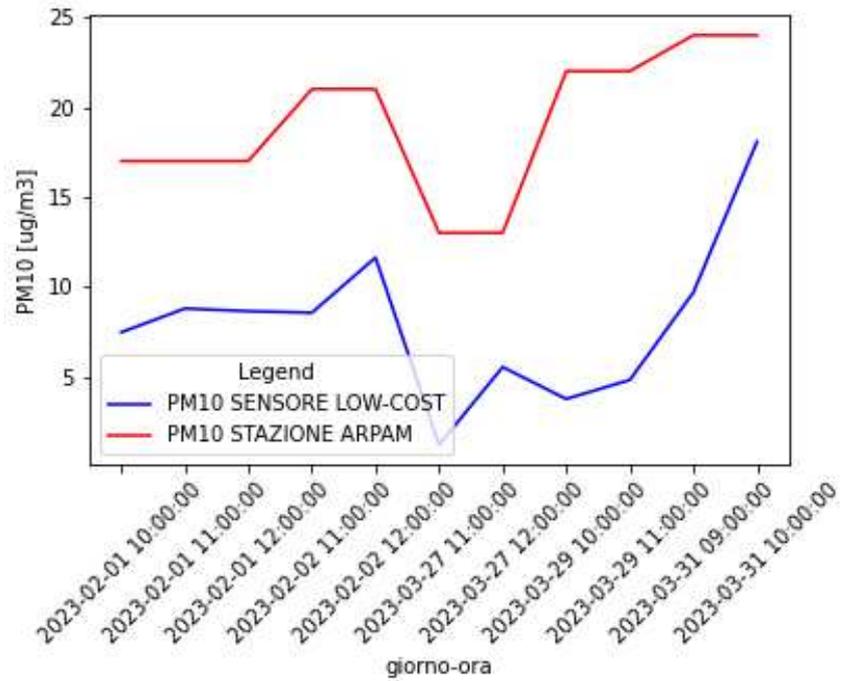


Figura 26. Grafico di confronto tra SENSORE A e Stazione ARPAM per PM10 outdoor

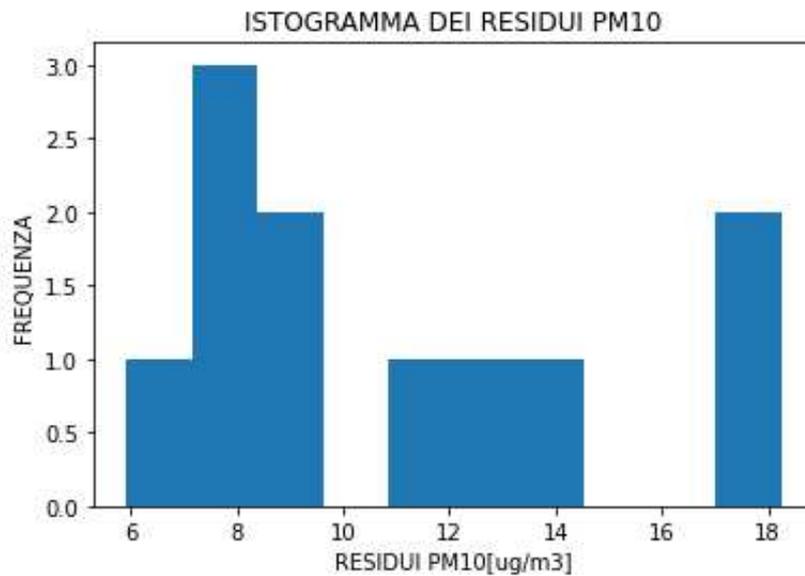


Figura 27. Istogramma residui SENSORE A per PM10 outdoor

| CARATTERISTICHE PM10 | VALORE |
|--|----------------------------------|
| Equazione retta regressione | $y=0,6x-3,8$ |
| Media residui \pm deviazione standard (σ) | $19,1 \pm 3,8$ |
| $2 * S_{qi}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | $2 * 5,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| $2 * S_{qi}$ (%) | 60% |

Tabella 13. Caratteristiche SENSORE A per PM10 outdoor

La differenza tra outdoor e indoor è sostanziale, basti visualizzare l'incertezza di misura percentuale che è circa il doppio di quella indoor. L'ipotesi di questa sostanziale differenza tra indoor e outdoor è data dalle temperature, umidità e vento; anche se il trend di misure è pressoché simile, ma l'andamento è ben diverso (**Figura 26**). Inoltre si può aggiungere che i sensori low-cost, come in questo caso il SENSORE A, sono molto dipendenti dalle condizioni che lo circondano. Quindi si può già notare che le misure indoor sono più accurate, rispetto a quelle outdoor.

- **SENSORE A PER LA MISURA DI PM2.5 OUTDOOR**

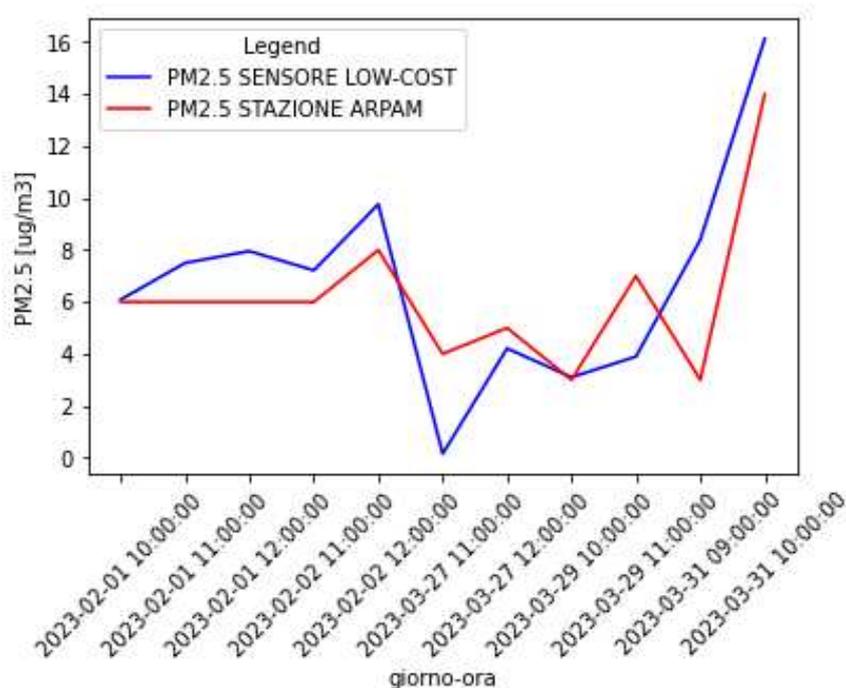


Figura 28. Grafico di confronto tra SENSORE A e Stazione ARPAM per PM2.5 outdoor

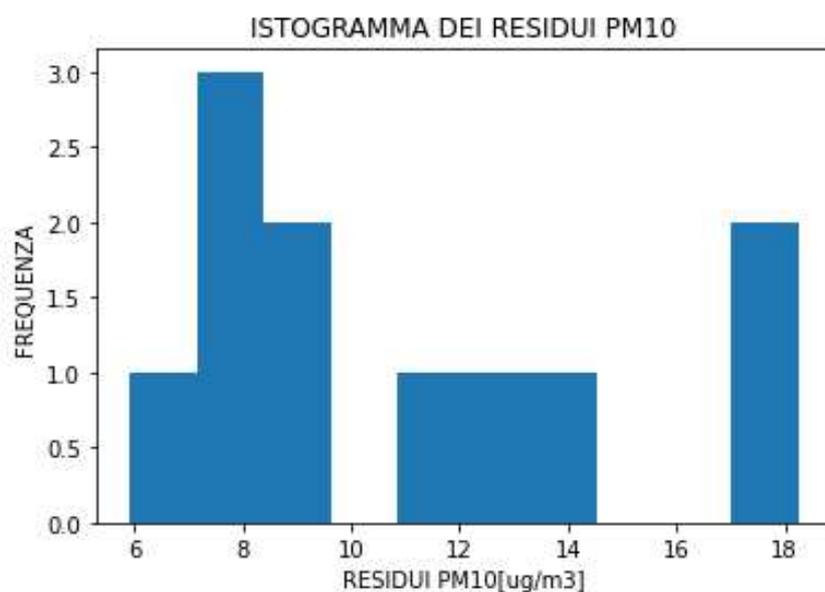


Figura 29. Istogramma residui SENSORE A per PM10 outdoor

| <u>CARATTERISTICHE PM2.5</u> | <u>VALORE</u> |
|--|--------------------------------------|
| Equazione retta regressione | $y=1,1x+0,02$ |
| Media residui \pm deviazione standard (σ) | $6,2 \pm 2,4$ |
| $2 \cdot S_{qi}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | $2 \cdot 2,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| $2 \cdot S_{qi}$ (%) | 72% |

Tabella 14. Caratteristiche SENSORE A per PM2.5 outdoor

Le misure outdoor per PM2.5 hanno un'incertezza finale percentuale simile a quella per PM10, hanno una variabilità molto alta per essere sensori di alta accuratezza. Dalla **Figura 28** si può notare che gli andamenti sono pressoché analogo, però il dato dell'incertezza è significativo.

- **SENSORE A PER LA MISURA DI PM1.0 OUTDOOR**

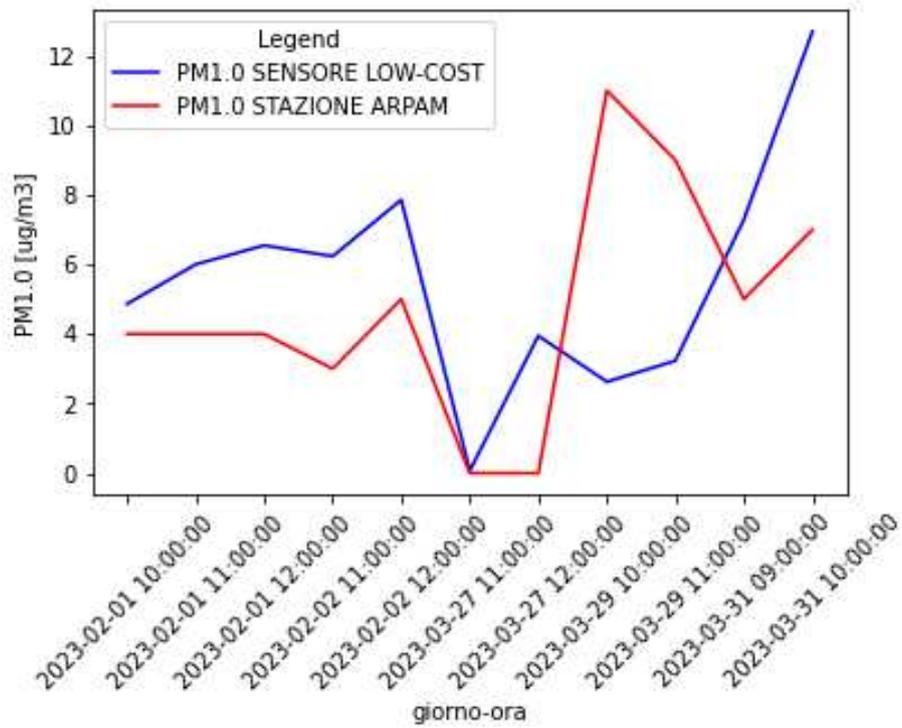


Figura 30. Grafico di confronto tra SENSORE A e Stazione ARPAM per PM1.0 outdoor

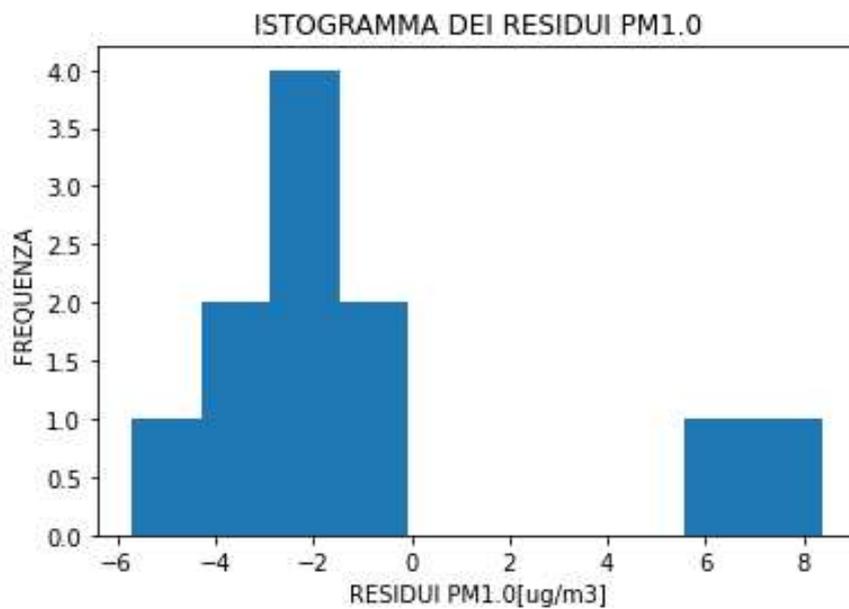


Figura 31. Istogramma residui SENSORE A per PM1.0 outdoor

| CARATTERISTICHE PM1.0 | VALORE |
|--|-----------------------------------|
| Equazione retta regressione | $y=0,2x+4,7$ |
| Media residui \pm deviazione standard (σ) | $4,7 \pm 4,0$ |
| $2 * S_{qi}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | $2 * 16,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| $2 * S_{qi}$ (%) | 700% |

Tabella 15. Caratteristiche SENSORE A per PM1.0 outdoor

Per quanto riguarda le misure di PM1.0 outdoor del sensore PMSA003I si è ottenuto un'incertezza pari al 700%, ben oltre i valori di PM10 e PM2.5. Si afferma che per le misure di PM1.0 questo tipo di sensore non è adatto. Nella **Figura 30** si può notare che l'andamento delle due curve non è simile, in quanto presentano dei picchi completamente sfasati.

- **SENSORE D ed E PER LA MISURA DI CO OUTDOOR**

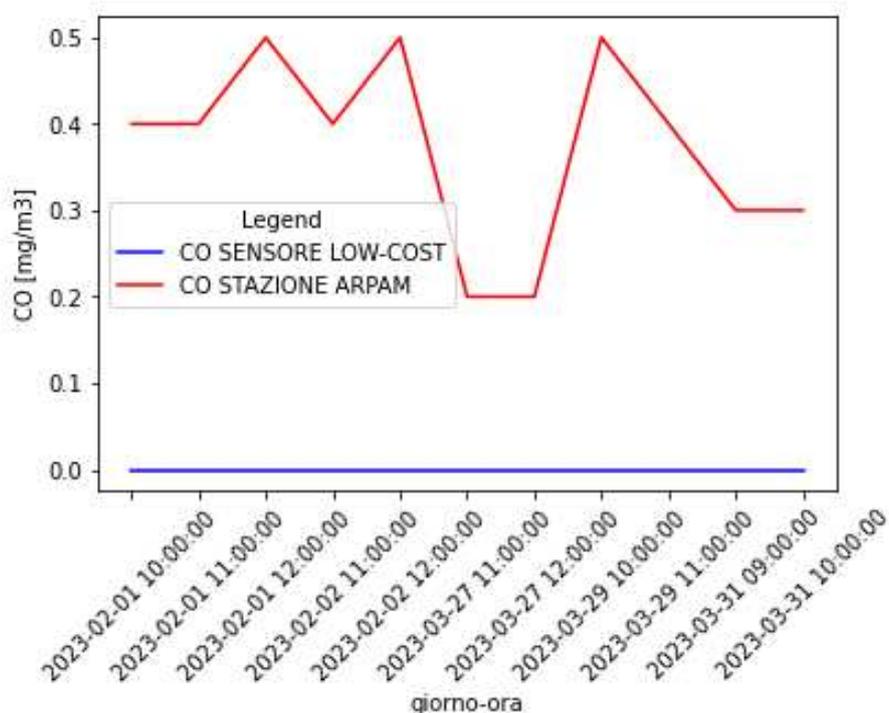


Figura 32. Grafico di confronto tra SENSORI E e d e Stazione ARPAM per CO outdoor

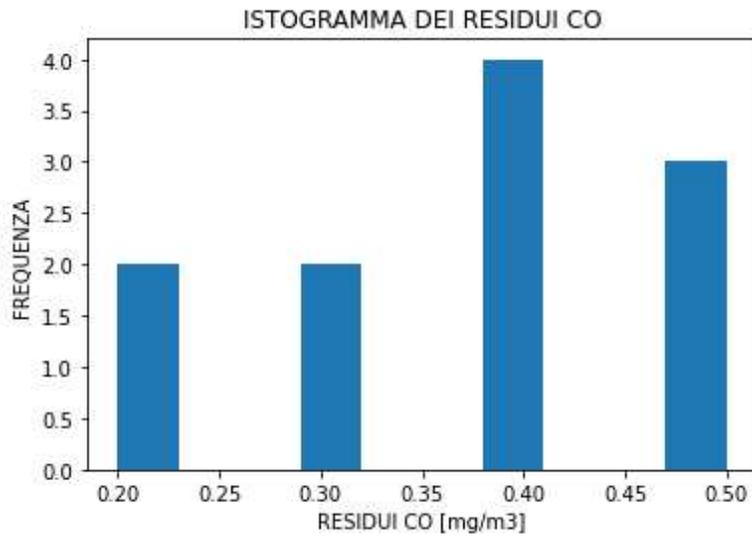


Figura 33. Istogramma residui SENSORI D ed E outdoor

I due sensori di concentrazione di gas (CO) sono del tutto poco affidabili, in quanto forniscono dati solo sullo zero, senza rispondere alle variazioni. Avendo tutti i dati pari a zero (**Figura 32**) non si è nemmeno in grado di calcolare l'incertezza, la media e la retta di regressione; l'unico dato che si è in grado di misurare è la deviazione standard, che è pari a $0,105\mu\text{g}/\text{m}^3$. Si può affermare che questo tipo di sensori, nonostante il loro basso costo, sono tutt'altro che attendibili.

- **SENSORE C PER LA MISURA DI RH OUTDOOR**

Per questo tipo di sensore è stata valutata solo l'umidità relativa, in quanto la stazione ARPAM e il Comfort Air non forniscono dati riguardanti la temperatura.

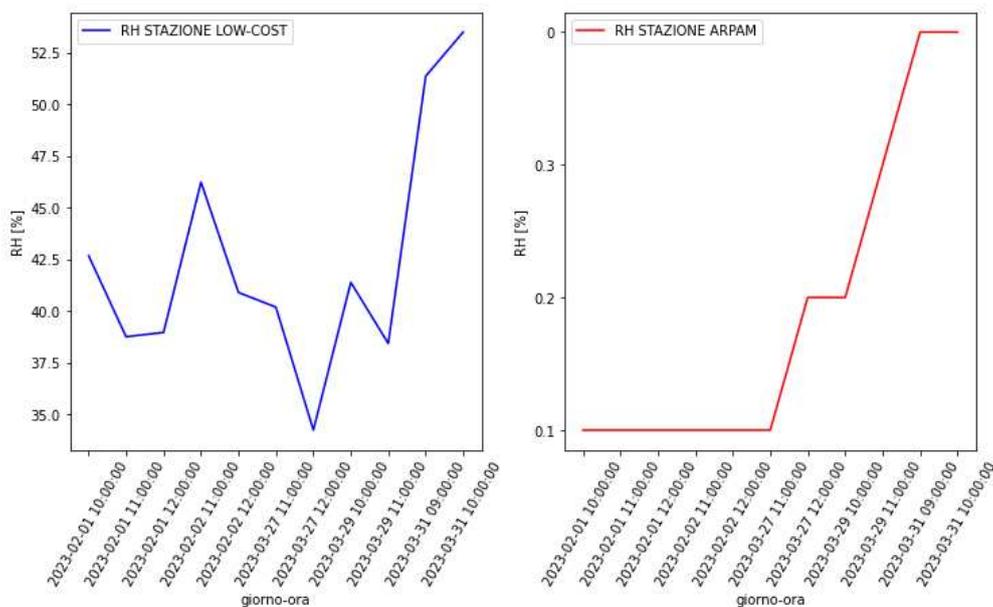


Figura 34. Grafico di confronto tra sensore DHT22 e Stazione ARPAM per RH outdoor

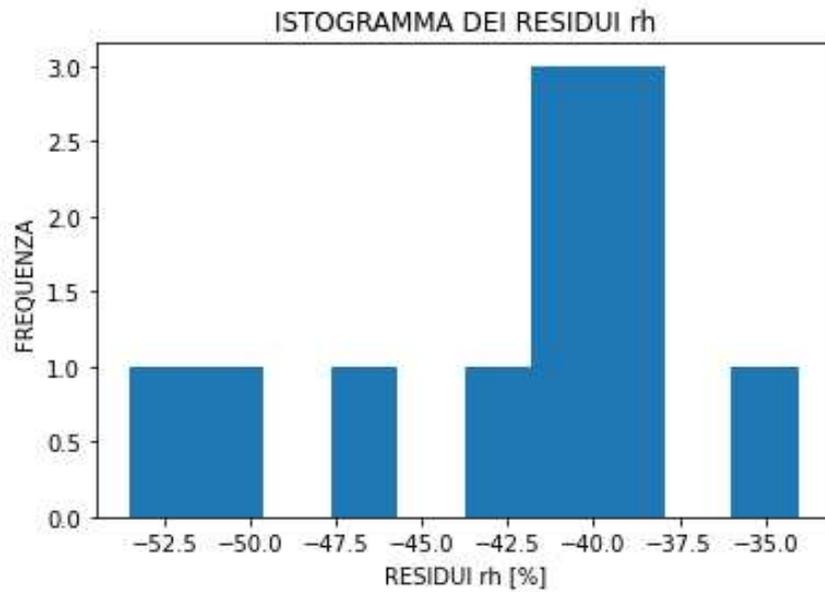


Figura 35. Istogramma residui DHT22 outdoor

| <u>CARATTERISTICHE PM1.0</u> | <u>VALORE</u> |
|--|----------------------------------|
| Equazione retta regressione | $y=-48x+48$ |
| Media residui \pm deviazione standard (σ) | $0,2 \pm 5,6$ |
| $2 * S_{qi}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | $2 * 0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| $2 * S_{qi}$ (%) | 128% |

Tabella 16. Caratteristiche DHT22 per CO outdoor

Si può subito notare che il SENSORE C, nella **Figura 34**, ha un andamento e dei risultati completamente differenti dalla stazione ARPAM. L'ipotesi è che il sensore non sia in grado di recepire umidità relativa, fornendo dei dati del tutto diversi. Nella **Tabella 14** è riportata l'incertezza percentuale con un valore di ben 128%, molto elevato per riuscire ad effettuare misure di alta precisione.

6. CONCLUSIONE

Lo scopo di questo progetto di tesi è quello di sviluppare una procedura per la calibrazione di LCS per la misura della qualità dell'aria. I parametri tipicamente monitorati sono PM10, PM2.5, PM1.0, e CO.

Il loro impiego sta trovando sempre più spazio, data la necessità nelle città di effettuare le misure di qualità dell'aria in più punti, e non soltanto dove sono localizzate le centraline di monitoraggio, molto costose ed ingombranti e quindi difficili da installare. Dunque, in questo lavoro è stato analizzato come gli LCS possono essere impiegati, e quali sono i loro punti di forza e svantaggi. Gli svantaggi sono legati alla loro incertezza di misura dovuta all'interferenza dei parametri meteorologici (temperatura dell'aria e umidità relativa) e dalla tecnologia utilizzata per la misura. Pertanto, è necessaria la loro calibrazione, che in questo caso è stata effettuata con un metodo tradizionale.

Dai risultati ottenuti si può notare che la differenza tra indoor ed outdoor è sostanziale a livello di incertezza per quanto riguarda sia PM10 che PM2.5, questo è dovuto soprattutto alle interferenze dell'ambiente esterno. Quindi si può affermare che i sensori low-cost sono molto sensibili alle condizioni che li circondano.

Per le misure indoor, il SENSORE A ha un'incertezza del 41,6% per PM10, mentre del 37,8% per PM2.5; ben differente è il SENSORE B che ha un'incertezza più elevata, del 962%. La differenza tra i due LCS è molta, oltretutto il SENSORE A ha un costo superiore rispetto al SENSORE B. Per le misure outdoor l'incertezza varia, difatti il SENSORE A ha un'incertezza del 60% per PM10 e del 72% per PM2.5, più alta rispetto alle misure indoor. Per le misure di PM1.0, il SENSORE A ha un risultato finale molto elevato, quindi si può sostenere che questo sensore non è adatto per le misure di PM1.0. I due SENSORI D ed E non rispondono alle minime variazioni di CO, quindi si può affermare che sono due sensori da scartare. Il sensore C ha una variazione molto marcata rispetto ai dati del sensore di riferimento, avendo infatti un'incertezza di ben 128%.

Per concludere si attesta che i sensori low-cost presentano numerosi vantaggi, tra i quali: capacità di effettuare misure in qualsiasi punto si voglia, basso costo e grandezze ridotte, rendendoli così più efficienti delle stazioni di monitoraggio; ma la loro attendibilità è davvero minima, da come si può riscontrare dalle incertezze elevatissime. Quindi l'utilizzo degli LCS si può effettuare se non si voglia effettuare misure molto accurate e di alta precisione.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] "Data-Driven Techniques for Low-Cost Sensor Selection and Calibration for the Use Case of Air Quality Monitoring" Rameez Raja Kureshi, Bhupesh Kumar Mishra, Dhavalkumar Thakker, Reena John, Adrian Walker, Sydney Simpson, Neel Thakkar and Agot Kirsten Wante
- [2] <https://www.snpambiente.it/2020/12/21/studio-di-arpa-veneto-sulle-performance-di-sensori-low-cost-per-la-misura-del-pm10/>
- [3] <https://eu.mouser.com/new/dfrobot/dfrobot-fermion-mems-gas-sensor-mics-2714/#Bullet-2>
- [4] <https://www.mouser.it/new/dfrobot/dfrobot-gravity-mems-gas-sensor/>
- [5] <https://www.mouser.it/ProductDetail/Adafruit/4632?qs=hWgE7mdlu5RenorKtmJORQ%3D%3D>
- [6] <https://www.adafruit.com/product/4632>
- [7] <https://www.homotix.it/vendita/umidita-temperatura/modulo-sensore-temperatura-umidita-dht22>
- [8] <https://www.mouser.it/ProductDetail/Sharp-Microelectronics/GP2Y1014AU0F?qs=rrS6PyfT74eynj5J61twvA%3D%3D&gclid=Cj0KCQjw06OTBhC ARIsAAU1yOX5fATUvtCXgfOI5kNXwbK 8 oCQ9kSEuSOrKb4oz0f0-XIMDz6oaApr EALw wCB>
- [9] <https://it.farnell.com/sharp/gp2y1010au0f/sensore-polvere-ottico/dp/9707956>
- [10] https://www.salute.gov.it/imgs/C_17_highlights_1_0_file.pdf
- [11] <https://www.inquinamento-italia.com/come-calibrare-un-sensore-per-misure-accurate/>
- [12] <https://oizom.com/how-does-air-quality-sensor-calibration-improve-data-accuracy/#:~:text=Air%20quality%20sensor%20calibration%20is,large%20scale%20air%20quality%20studies.>
- [13] <https://lorenzocasaburo.it/arduino/utilizzare-il-sensore-di-temperatura-dht22-con-arduino/>
- [14] <https://learn.adafruit.com/pmsa003i/arduino>
- [15] [https://wiki.dfrobot.com/Fermion MEMS Gas Sensor MiCS-2714 SKU SEN0441](https://wiki.dfrobot.com/Fermion+MEMS+Gas+Sensor+MiCS-2714+SKU+SEN0441)
- [16] [https://wiki.dfrobot.com/ SKU SEN0377 Gravity MEMS Gas Sensor CO Alcohol NO2 NH3 I2C MiCS 4514](https://wiki.dfrobot.com/SKU+SEN0377+Gravity+MEMS+Gas+Sensor+CO+Alcohol+NO2+NH3+I2C+MiCS+4514)
- [17] <https://create.arduino.cc/projecthub/mircemk/diy-air-quality-monitor-with-sharp-gp2y1010au0f-sensor-7b0262>

- [18] <https://www.inquinamento-italia.com/come-calibrare-un-sensore-per-misure-accurate/>
- [19] <https://oizom.com/how-does-air-quality-sensor-calibration-improve-data-accuracy/#:~:text=Air%20quality%20sensor%20calibration%20is,large%20scale%20air%20quality%20studies.>
- [20] <https://www.regione.marche.it/Regione-Utile/Ambiente/ARPAM>
- [21] <https://metone.com/products/bam-1020/>
- [22] <https://metone.com/wp-content/uploads/2019/05/BAM-1020-9800-Manual-Rev-W.pdf>
- [23] <https://www.sanpellegrino-corporate.it/it/impegno-per-ambiente/effetto-serra-cose-cause-conseguenze#:~:text=Il%20primo%20responsabile%20dell'effetto,uno%20dei%20principali%20gas%20serra.>