

D. SURIANO

Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali
Divisione Tecnologie e Processi dei Materiali
per la Sostenibilità
Laboratorio Materiali Funzionali e Tecnologie per
Applicazioni Sostenibili
Centro Ricerche Brindisi

PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE DI UNA SCHEDA ELETTRONICA PER SENSORI ELETTROCHIMICI DI GAS INQUINANTI DELL' ATMOSFERA

RT/2024/3/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

I rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina www.enea.it

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Agenzia

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE DI UNA SCHEDE ELETTRONICA PER SENSORI ELETTROCHIMICI DI GAS INQUINANTI DELL' ATMOSFERA

D. Suriano

Riassunto

Il monitoraggio della qualità dell'aria è effettuato dalle agenzie preposte con strumentazione basata su tecnologie estremamente affidabili, ma che comportano costi elevati, sia per quanto riguarda l'acquisto degli strumenti stessi, sia per ciò che concerne la loro manutenzione e gestione. Un'alternativa a tali tecnologie è rappresentata dai sensori elettrochimici per gas che, sebbene siano caratterizzati da minore accuratezza, presentano vantaggi quali: costi molto contenuti, alto livello di miniaturizzazione, e necessità di manutenzione pressoché nulla. Tra i sensori per gas inquinanti presenti nell'ambiente, quelli che offrono le prestazioni più interessanti sono rappresentati dai sensori a celle elettrochimiche. Per il funzionamento di tali dispositivi, è necessario un circuito elettronico appositamente progettato che è realizzato su schede elettroniche solitamente fornite dall'azienda produttrice dei sensori. Il lavoro presentato in questo documento concerne la progettazione e realizzazione di una scheda elettronica per la serie "B" dei sensori elettrochimici prodotti dalla Alphasense. Tale azienda fornisce schede elettroniche su cui è possibile installare solo un singolo sensore, ma non dà la possibilità di usare più tipi di sensori in contemporanea. Tale caratteristica limita fortemente il livello di miniaturizzazione dei dispositivi per il monitoraggio della qualità dell'aria il cui funzionamento si basa su tali sensori. Questa, ed altre limitazioni, hanno motivato la progettazione e realizzazione di una nuova scheda elettronica, della quale vengono illustrati i dettagli progettuali e realizzativi in questo documento.

Parole chiave: sensori, gas, basso costo, elettrochimico, qualità dell'aria, ppb, ambiente.

Abstract

Air quality monitoring is performed by on-purpose agencies through instrumentation based on extremely reliable technologies, but featured by high costs, both as concerning their purchase, and their maintenance and management. An option for these technologies is represented by the electrochemical gas sensors which, even though characterized by a lower accuracy, offer some advantages, such as: low costs, high miniaturization grade, and no maintenance.

Among the gas sensors designed for air quality monitoring, the most interesting are the ones based on the electrochemical cells. To operate such sensors, it is necessary an electronic circuit typically implemented on electronic boards provided by the sensor manufacturer.

The work exposed in this document regards the design and implementation of an electronic board to support the operation of the "B" series of the electrochemical gas sensors produced by Alphasense. This brand provides electronic boards on which it is possible to install only one sensor, but they do not allow the use of more sensors at the same time. This feature heavily restrains the grade of miniaturization of the devices which design is based on such sensors. To overcome this and other limitations, a new electronic board has been designed and implemented. In this document, its design and the implementation details are exposed.

Keywords: sensors, gas, low-cost, electrochemical, air quality, ppb, environment.

INDICE

1. Introduzione.....	7
2. Caratteristiche dei sensori	8
3. Caratteristiche della scheda ISB.....	10
4. Le specifiche di progetto.....	12
5. Realizzazione della scheda e sue caratteristiche	14
6. Test del dispositivo e sua modalità d'uso.....	18
7. Conclusioni.....	20
Bibliografia.....	21

1. Introduzione

Nell'ambito delle attività del Laboratorio "Test e caratterizzazione sensori per gas" del Dipartimento SSPT del centro ENEA di Brindisi, uno dei filoni di ricerca è rappresentato dallo sviluppo di dispositivi basati su tecnologie a basso costo per il monitoraggio della qualità dell'aria in tempo reale [1,2,3,4].

Tali tecnologie sono basate sull'uso di sensori per gas miniaturizzati che, sebbene forniscano misure meno accurate rispetto agli analizzatori chimici impiegati dalle agenzie preposte, come le varie ARPA regionali, offrono indubbi vantaggi come: bassi costi di acquisto, assenza di operazioni di manutenzione, alto grado di miniaturizzazione, e bassi consumi elettrici [5,6,7,8].

Tra i sensori su cui si è maggiormente concentrata l'attività di ricerca, figurano i sensori elettrochimici, poiché offrono prestazioni più interessanti rispetto ad altre tipologie presenti sul mercato, o in via di sviluppo [7,8]. Rivestono di particolare interesse i sensori prodotti dalla Alphasense [9] poiché caratterizzati da un ottimo rapporto qualità prezzo, in aggiunta alla loro capacità di poter essere impiegati in dispositivi portatili, essendo di dimensioni molto ridotte. Altra importante peculiarità che desta particolare interesse, comune a tutti i sensori a cella elettrochimica, è il consumo estremamente ridotto di energia elettrica, quantificabile in pochi microwatts. La loro minore accuratezza, se li si paragona agli analizzatori chimici che tradizionalmente vengono impiegati dalle agenzie di monitoraggio dell'inquinamento dell'aria, è dovuta alla loro sensibilità, ed all' influenza di altri parametri ambientali, come temperatura, umidità, e presenza di gas interferenti [7,8,9,10,11,12,13]. La comunità scientifica che lavora con questi dispositivi è impegnata a sviluppare tecniche di compensazione che annullino questi effetti di disturbo agenti sulle prestazioni di questi sensori, migliorandone l'accuratezza [8,10,12,13,14,15].

Entrando più nello specifico, il nostro laboratorio ha prestato particolare attenzione alle prestazioni dei quattro sensori CO-B4, NO₂-B43F, OX-B431, SO₂-B4 [9] della Alphasense, sviluppati per il monitoraggio rispettivamente di CO, NO₂, O₃, e SO₂, che risultano essere tra i principali inquinanti atmosferici. Per il corretto funzionamento di questi sensori è necessaria un'opportuna circuiteria elettronica che è implementata in una apposita scheda elettronica. L'azienda produttrice dei suddetti sensori fornisce la scheda elettronica di supporto dedicata ai modelli di sensori di nostro interesse, e afferenti alla serie "B" dei sensori elettrochimici per gas; essa è

denominata ISB [9], e provvede a fornire un segnale analogico di uscita dipendente dalla concentrazione di gas che sta interessando il sensore. Purtroppo, tale scheda è caratterizzata da una serie di limitazioni che rendono difficoltoso lo studio delle prestazioni dei sensori. Tra esse, la più evidente è rappresentata dalla impossibilità di montare più di un sensore per volta; quindi, al fine di superare tali limiti e di dotare il laboratorio di uno strumento più adatto per effettuare le attività sperimentali previste, si è proceduto alla progettazione e realizzazione di una scheda elettronica più rispondente alle particolari esigenze di tipo sperimentale. Si è scelto di denominare la scheda in questione: "Alphasense-B4-multisensor-board" (B4Amb).

2. Caratteristiche dei sensori

I sensori per i quali è stata progettata la B4Amb sono afferenti alla serie "B" dei sensori elettrochimici della Alphasense. Essi sono stati progettati per misurare la concentrazione di gas inquinanti in ambiente fino a livelli di qualche decina di ppb, come dichiarato dal costruttore. Al fine di avere un'idea circa i valori tipici delle concentrazioni dei gas inquinanti "target" dei sensori in questione riscontrabili in ambiente, è utile visionare la tabella 1 estratta dal sito web dell' ARPA Veneto [16].

GAS	Valore limite	Condizione
NO ₂	106 ppb	Valore limite orario: da non superare più di 18 volte per anno civile
O ₃	90 ppb	massima concentrazione oraria
CO	9 ppm	Massima media mobile 8h giornaliera
SO ₂	134 ppb	Valore limite orario: da non superare più di 24 volte per anno civile

Tabella 1: valori di concentrazione di primo allarme relativi ai gas inquinati atmosferici misurati dai sensori presi in esame.

Le celle elettrochimiche costituenti l'elemento sensibile sono racchiuse in contenitori le cui dimensioni fisiche sono uguali per tutti i quattro sensori su citati (vedi figura 1).

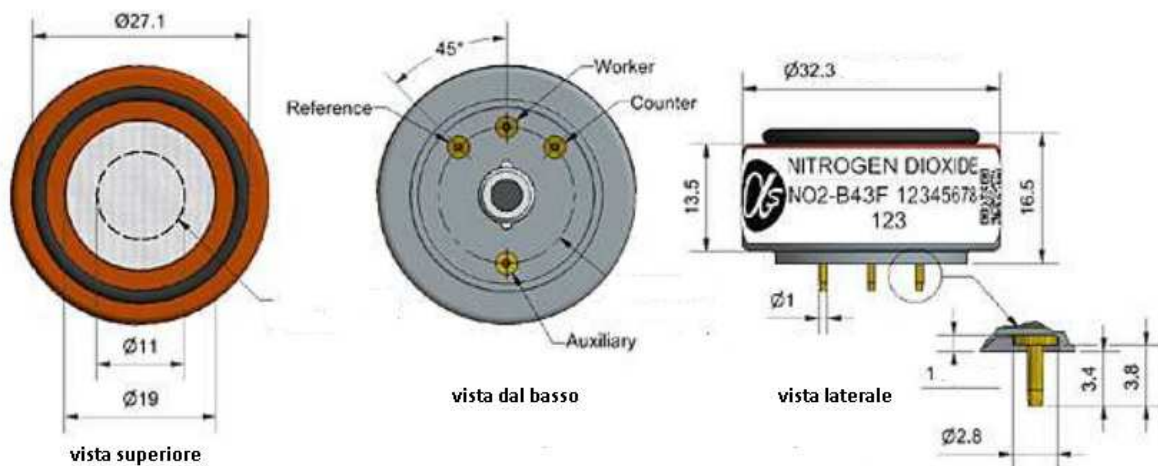


Figura 1: dimensioni fisiche dei sensori NO2-B43F, OX-B431, CO-B4, SO2-B4.

L' interfaccia dei sensori con l'elettronica di supporto è costituita da quattro elettrodi denominati: "working", "reference", "counter", e "auxiliary". La scheda elettronica di supporto ha diversi compiti da svolgere per assicurare il corretto funzionamento del sensore. Principalmente, essa dovrà far sì che tra gli elettrodi "working" e "reference" ci sia lo stesso potenziale elettrico, e avrà cura che la tensione sul "reference" sia quanto più fissa e costante possibile. Inoltre, avrà il compito di raccogliere la debole corrente elettrica proveniente dall' elettrodo "working" (si tratta di qualche nanoAmpere) che dipende linearmente dalla concentrazione di gas che diffonde nell'elemento sensibile. La corrente elettrica in uscita dall'elettrodo "auxiliary" sarà invece utile per compensare parzialmente le oscillazioni della corrente di "zero", ossia la corrente che dovrebbe fornire il sensore quando esposto a una concentrazione nulla del gas "target". Ovviamente, la scheda elettronica di supporto dovrà leggere anche tale corrente per una corretta determinazione del livello di concentrazione del gas. Le specifiche tecniche dei sensori presi in considerazione sono riassunte nella tabella 2; essi sono estratti dai fogli tecnici dei dispositivi consultabili sul sito del produttore [9]. Come evidenziato dal produttore stesso, le prestazioni del sensore, e in particolare, il limite inferiore di rilevabilità delle concentrazioni di gas, dipendono molto dalle prestazioni dell' elettronica caratterizzante la scheda di supporto su cui essi verranno montati. Esso è inoltre influenzato dai valori relativi alla sensibilità dei sensori, dall'ampiezza delle variazioni delle correnti di zero, e dal rumore contenuto nelle deboli correnti in uscita dal sensore stesso.

	NO2-B43F	OX-B431	CO-B4	SO2-B4
Sensibilità [nA/ppm]	-200/-650	-225/-750	420/650	275/520
Tempo di risposta [s]	<80	<80	<30	<60
Corrente di zero [nA]	-80/+80	-80/+80	-250/30	-100/+100
Rumore [ppb]	15	15	4	5
Intervallo di misura [ppm]	20	20	1000	100
Linearità [ppb]	-0,5/+0,5	-0,5/+0,5	20/35	-2/0

Tabella 2: principali specifiche tecniche dei sensori estratte dai fogli tecnici pubblicati dal costruttore.

Dando uno sguardo alla tabella 2, o più in generale ai fogli tecnici pubblicati dal costruttore dei sensori, si può notare che non compaiono dati circa la risoluzione dei sensori e la loro accuratezza. Questa mancanza di informazioni è voluta, ed è dovuta al fatto che le condizioni ambientali, che possono essere sintetizzate in parametri come: temperatura e umidità ambientali, e concentrazione di gas interferenti, influiscono su sensibilità, corrente di zero e rumore, le quali, a loro volta, determinano l'accuratezza e la risoluzione finale. A ciò si deve aggiungere che il rumore elettronico dovuto alla scheda elettronica di supporto, e la sua capacità di amplificare adeguatamente le correnti elettriche in uscita dal sensore, influiscono pesantemente sull'accuratezza e risoluzione finale del sistema "sensore-scheda elettronica di supporto". Gli elementi appena esposti sono alla radice degli errori di misurazione e rappresentano pertanto il limite caratterizzante questa tecnologia.

Il progetto della scheda elettronica a supporto dei sensori riveste quindi un'importanza particolare, e deve avere come priorità un' adeguato livello di amplificazione delle deboli correnti di uscita del sensore, introducendo la minima quantità di rumore elettronico possibile.

3. Caratteristiche della scheda ISB

Il costruttore dei sensori produce e distribuisce una scheda elettronica dedicata per permettere un pronto utilizzo dei sensori stessi. La serie "B" dei sensori elettrochimici è supportata dalla scheda elettronica denominata ISB, il cui aspetto fisico è esposto in figura 2.

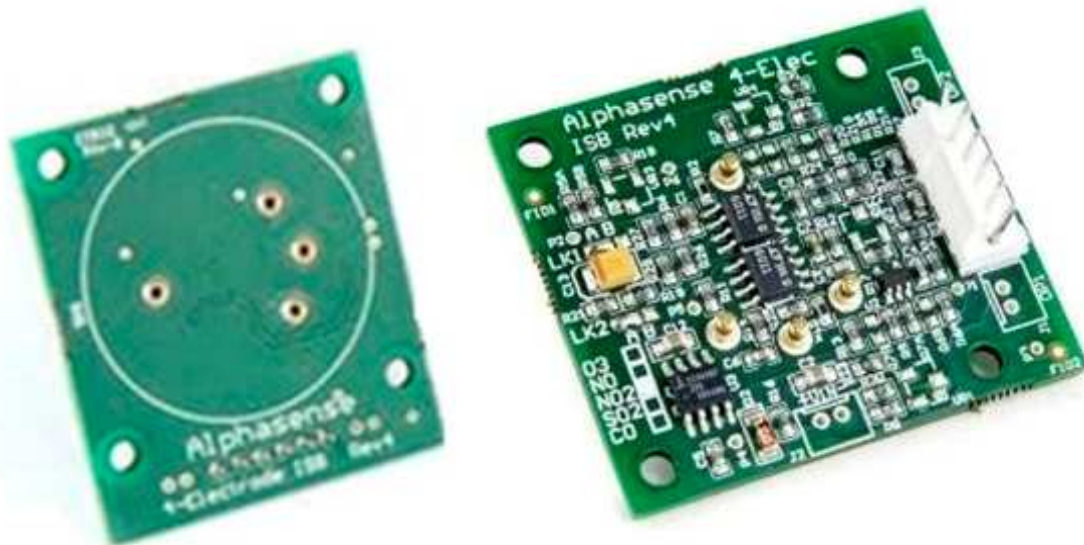


Figura 2: lato superiore a sinistra, e inferiore a destra, della scheda elettronica ISB.

La scheda ISB garantisce il funzionamento dei sensori fornendo i due segnali analogici di uscita relativi alle correnti degli elettrodi “working” e “auxiliary” dai quali si calcolerà la concentrazione di gas rilevata dal sensore. Essa è alimentabile con una tensione che va da 3,5V a 6V, ed ha un assorbimento minore di 1,5 mA. I segnali di uscita variano da 0,5V fino alla tensione di alimentazione.

I limiti caratterizzanti tale scheda possono essere sintetizzati nei seguenti punti:

- 1) L'utilizzo di un solo sensore per volta costringe ad usare più schede ISB per ogni tipo di gas di cui se ne vuole misurare la concentrazione. Come conseguenza, l'impiego di più schede ISB aumenta i costi della macchina sulla quale si vuole installare i sensori, ne accresce le dimensioni fisiche e, dovendo impiegare quattro cavi per ogni ISB utilizzato, incrementa la lunghezza totale della cassetteria interna alla macchina che, a sua volta, raccoglie rumore elettronico, a discapito della qualità del segnale in uscita dalle schede ISB stesse.
- 2) Non è prevista la possibilità di regolare il guadagno di amplificazione delle correnti del sensore. Tale limite impedisce un uso ottimale del sistema “sensore-scheda”, non permettendo di utilizzare al meglio il dispositivo nel caso in cui si passi da ambienti poco inquinati, ad ambienti con una concentrazione di inquinanti mediamente elevata.
- 3) Non è prevista la possibilità di regolare il livello della tensione di zero dei due segnali d'uscita, che è fissato a 0,5V. La possibilità di diminuire questo

parametro, permetterebbe di incrementare la dinamica in uscita del segnale, e quindi, di ottenere un campo di misurazione più ampio.

- 4) Non è inserito nel circuito elettronico della scheda ISB un sistema automatico che cortocircuiti gli elettrodi “working” con il “reference”, e l’ “auxiliary” con il “reference”. Tale informazione si desume dallo schema elettrico della scheda ISB, che non è pubblicato sul sito del costruttore, ma viene fornito all’utente nel momento in cui viene acquistata la scheda. La mancanza di tale elemento si traduce in un notevolissimo incremento del tempo di “warm-up” del sensore. Infatti, la tecnologia caratterizzante questo tipo di sensori è tale che, nel momento in cui si accende la macchina e si dà alimentazione al sensore, occorre un certo tempo iniziale (qui denominato tempo di “warm-up”) affinché i livelli dei segnali in uscita si stabilizzino e diano valori che si possano ritenere affidabili e veritieri.

4. Le specifiche del progetto

L’esigenza di superare i limiti insiti nella scheda ISB, in aggiunta alle “desiderata” caratterizzanti le attività sperimentali, hanno dettato le specifiche progettuali della scheda B4Amb, che riassumiamo nei seguenti punti:

- 1) Il progetto della nuova scheda dovrà permettere l’utilizzo di più sensori per volta. La serie “B” dei sensori Alphasense dovrebbe essere in grado di poter misurare le concentrazioni dei gas elencati nella tabella 1 ben al di sotto delle soglie di allarme, che è uno degli obiettivi concernenti le attività sperimentali del nostro laboratorio. Tale osservazione induce a progettare la B4Amb per un uso esclusivo di sensori afferenti alla linea “B” della Alphasense.
- 2) Il guadagno di amplificazione delle correnti “working” e “auxiliary” deve poter essere regolabile. Ciò permetterebbe un uso ottimale del sensore, aumentando l’amplificazione se il dispositivo dovesse essere usato in ambienti poco inquinati, o comunque con basse concentrazioni del gas “target”; e diminuendolo, nel caso in cui si dovesse impiegarlo in ambienti molto inquinati, o con una concentrazione media del gas “target” molto elevata.
- 3) La tensione di zero in uscita dal sistema “scheda-sensore” deve poter essere anch’essa regolabile. Una diminuzione di tale valore permetterebbe un allargamento del campo di misurazione, ma se tale diminuzione dovesse

essere eccessiva, potremmo ottenere una saturazione sullo zero dovuta alle fluttuazioni delle correnti di zero, dipendenti dai parametri ambientali. Tale eventualità è da evitare perché produrrebbe delle letture delle concentrazioni gassose affette da un considerevole errore.

- 4) La scheda B4Amb dovrà avere un meccanismo di cortocircuitazione automatica degli elettrodi “working” e “auxiliary” con il “reference” in assenza di tensione di alimentazione per i motivi già esposti al punto 4 della precedente sezione.
- 5) La scheda B4Amb dovrà avere le minime dimensioni fisiche, al fine di poterla integrare in monitor o dispositivi le cui dimensioni possano garantire una certa portabilità degli strumenti.
- 6) La tensione di alimentazione dovrà essere compresa tra 3,5V e 5V in modo da poter essere utilizzata con un'ampia gamma di componenti “hardware” necessarie per le elaborazioni finali dei dati e la loro memorizzazione.
- 7) L'assorbimento massimo di corrente di alimentazione non deve superare i 4mA. Tale peculiarità garantirebbe un impiego della B4Amb in dispositivi alimentati a batteria. Infatti, l'eventuale eccessivo assorbimento di corrente, limiterebbe notevolmente la durata della batteria stessa.
- 8) La quantità di rumore elettronico prodotto dai componenti elettronici della scheda dovrà essere la minima possibile. Infatti, esso dovrà essere molto limitato, sia nella catena di amplificazione delle correnti in uscita dal sensore, sia nel blocco di alimentazione della scheda elettronica. Bisogna infatti considerare che, l'uso di amplificatori operazionali nella catena di amplificazione che producano eccessivo rumore, produrrebbe segnali di uscita elettronicamente “rumorosi”, il che si riflette in un degrado della risoluzione nelle misure di concentrazione dei gas. Anche il blocco di alimentazione riveste un ruolo molto delicato in termini di “performance” finale del dispositivo. Fornire una tensione di alimentazione al sensore e alla catena di amplificazione stabile e con un basso contenuto di rumore elettronico, significa ottenere correnti di “working” e “auxiliary” non rumorose, il che avvantaggia l'accuratezza del sistema “sensore-scheda”.

5. Realizzazione della scheda e sue caratteristiche

Il progetto è stata realizzato con tecnologia PCB (Printed Circuit Board) su basetta ramata a doppia faccia e componentistica elettronica di tipo SMD (Surface Mounted Devices). Questa soluzione ha permesso la realizzazione della scheda B4Amb con le minime dimensioni fisiche (9,2 cm x 7,4 cm), permettendo anche che la quantità di rumore elettronico di tipo elettromagnetico captato dalla circuiteria sia minima. L'aspetto finale della scheda è raffigurato nella figura 3.

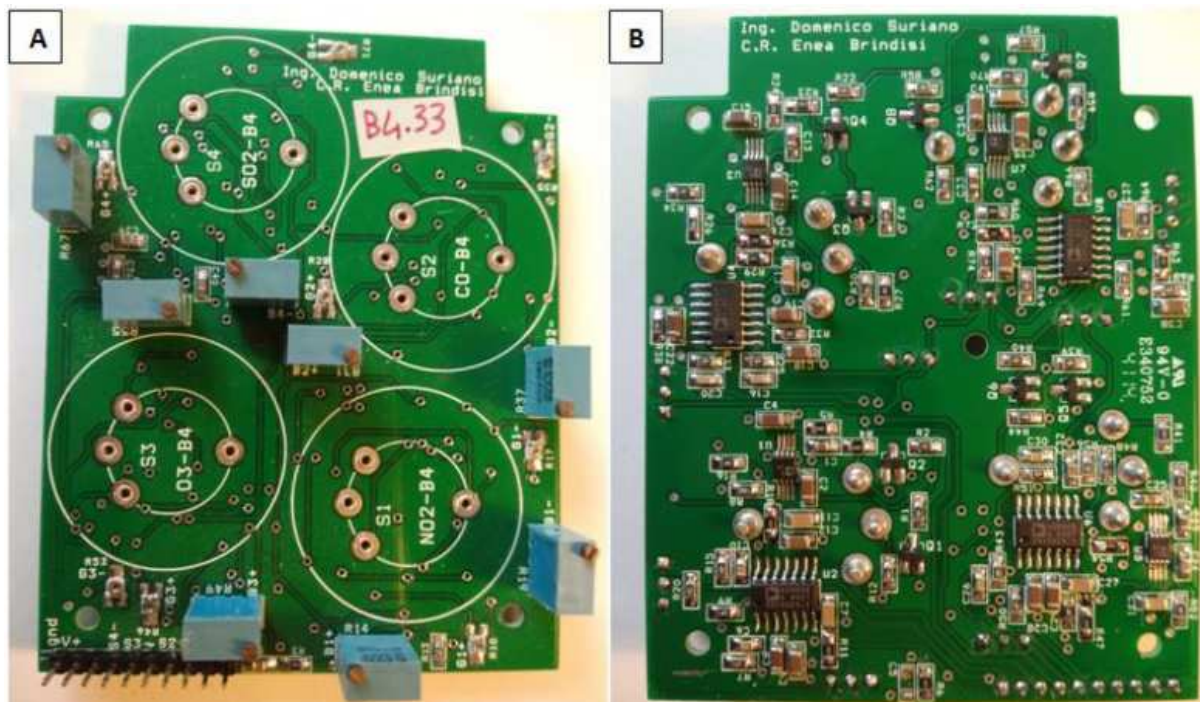


Figura 3: scheda B4Amb vista dal lato superiore: A); vista dal lato inferiore: B).

Il numero di sensori installabili contemporaneamente sulla scheda è quattro, come si può evincere dalla figura 3. Sebbene la B4Amb sia stata progettata per i sensori indicati nella tabella 2, essa risulta idonea per essere usata con altri modelli afferenti alla linea “B” della Alphasense. La lista completa dei sensori utilizzabili con la B4Amb è indicata nella tabella 3. Le posizioni su cui montare i sensori sono contrassegnate con S1, S2, S3, S4. Per comodità è indicato anche il tipo di sensore, ma fermo restando che i sensori utilizzabili con la scheda sono quelli indicati nella tabella 3, l'utente è libero di montare uno dei modelli della tabella appena menzionata in una qualsiasi delle quattro posizioni. Da notare che non tutti i sensori della linea “B” sono utilizzabili con la scheda in oggetto; infatti, alcuni di essi richiedono una tensione di “bias” sull'elettrodo “reference” che non viene applicata

dalla circuiteria elettronica implementata nella B4Amb. La tabella 3 esclude tali tipi di sensori, le cui specifiche sono però comunque visionabili sul sito del costruttore [9]. Le caratteristiche principali della scheda sono invece riassunte nella tabella 4.

Sensori	Gas "target"
<i>NO2-B43F; NO2-B1</i>	<i>NO₂</i>
<i>OXB-431</i>	<i>O₃</i>
<i>CO-B4; CO-BX; CO-B1; CO-BF</i>	<i>CO</i>
<i>SO2-B4; SO2-BF; SO2-BE</i>	<i>SO₂</i>
<i>VOC-B4</i>	<i>VOC</i>
<i>H2S-B1; H2S-B4; H2S-BH; H2S-BE</i>	<i>H₂S</i>
<i>H2O2-B1</i>	<i>H₂O₂</i>
<i>HCN-B1</i>	<i>HCN</i>
<i>PH3-B1; PH3-BE</i>	<i>PH₃</i>
<i>HCL-B1</i>	<i>HCl</i>
<i>H2-BF</i>	<i>H₂</i>
<i>CL2-B1</i>	<i>Cl₂</i>

Tabella 3: sensori utilizzabili con la scheda B4Amb.

Dimensioni	<i>9,2 cm x 7,4 cm</i>
Tensione di alimentazione	<i>3,5V – 5V</i>
Massima corrente di assorbimento	<i>3,5 mA</i>
Guadagno di amplificazione	<i>5 * 10⁵ V/A – 3 * 10⁶ V/A</i>
Numero di sensori installabili	<i>4</i>
Intervallo delle tensioni d'uscita	<i>0V – tensione di alimentazione</i>

Tabella 4: principali caratteristiche della scheda B4Amb

I segnali d'uscita del dispositivo sono costituiti da 8 tensioni analogiche il cui valore è in relazione con le concentrazioni di gas sperimentate dai sensori montati sulla scheda. Essi sono posizionati come indicato nella figura 5. A titolo d'esempio, il segnale di tensione S_{1+} rappresenta il segnale amplificato della corrente dell'elettrodo "working" del sensore montato in posizione S_1 , mentre S_{1-} è la tensione relativa alla corrente dell' elettrodo "auxiliary".

I files necessari per l'implementazione della scheda, compreso lo schema elettrico, sono stati realizzati con il CAD Orcad 10.5. Essi sono caricati e archiviati su un sito

web [17] di pubblico accesso, dove si può anche trovare la lista completa dei componenti elettronici che ne compongono il circuito elettrico. La regolazione dell' amplificazione dei segnali viene effettuata agendo con un cacciavite sui resistori presenti sul lato superiore della scheda come evidenziato in figura 4, e la loro funzione è descritta nella tabella 5. La tensione di zero viene invece regolata agendo su altri resistori variabili di precisione, la cui collocazione è indicata in figura 5. La funzionalità dei resistori appena menzionati è descritta in maniera organica e sintetica nella tabella 6.

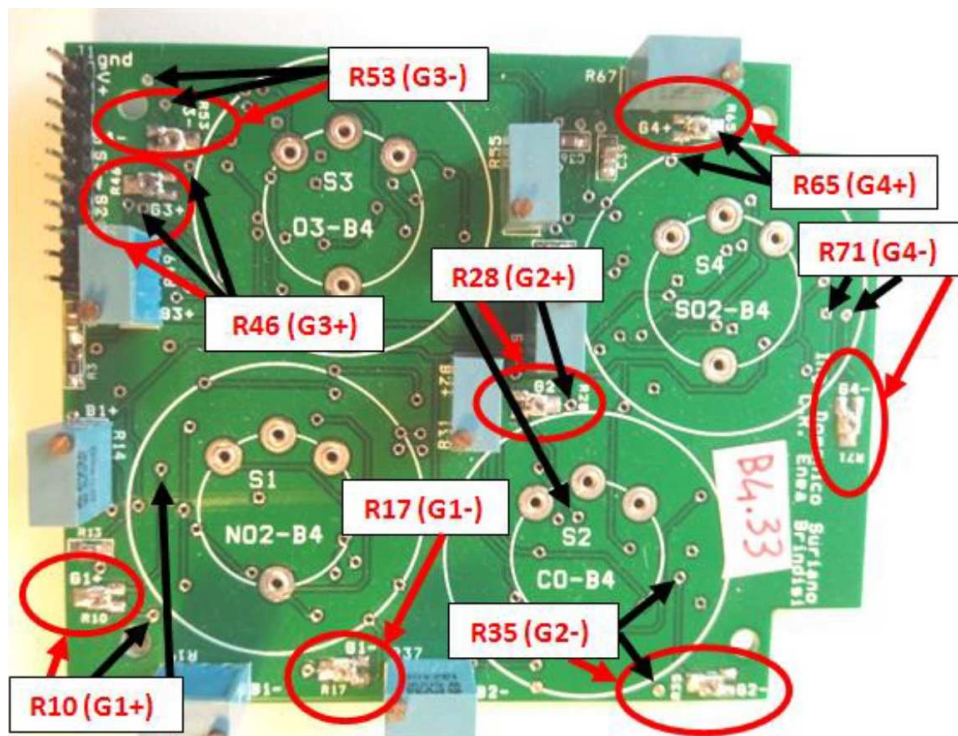


Figura 4: collocazione dei resistori per la regolazione del guadagno di amplificazione. Le frecce nere indicano i punti dove rilevare il valore delle resistenze tramite un ohmetro.

Nome del resistore e alias	Funzione
<i>R17 (G1-)</i>	<i>Regolazione del guadagno di amplificazione della corrente "auxiliary" S1</i>
<i>R10 (G1+)</i>	<i>Regolazione del guadagno di amplificazione della corrente "working" S1</i>
<i>R35 (G2-)</i>	<i>Regolazione del guadagno di amplificazione della corrente "auxiliary" S2</i>
<i>R28 (G2+)</i>	<i>Regolazione del guadagno di amplificazione della corrente "working" S2</i>
<i>R53 (G3-)</i>	<i>Regolazione del guadagno di amplificazione della corrente "auxiliary" S3</i>
<i>R46 (G3+)</i>	<i>Regolazione del guadagno di amplificazione della corrente "working" S3</i>
<i>R71 (G4-)</i>	<i>Regolazione del guadagno di amplificazione della corrente "auxiliary" S4</i>
<i>R65 (G4+)</i>	<i>Regolazione del guadagno di amplificazione della corrente "working" S4</i>

Tabella 5: nomi dei resistori che regolano l' amplificazione e loro funzione specifica

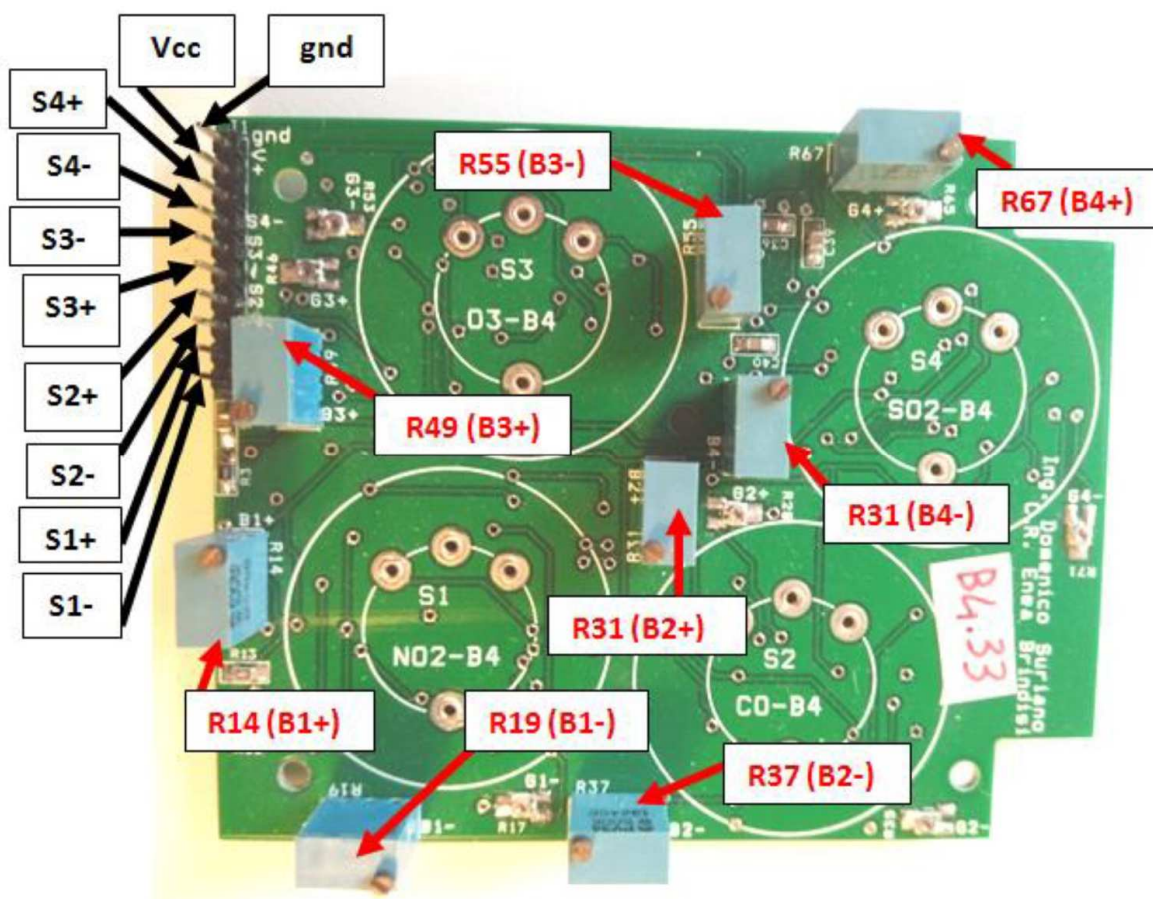


Figura 5: dislocazione dei resistori di precisione per la regolazione della tensione di zero e posizionamento dei “pin” dei segnali di uscita. Il simbolo (-) simboleggia la corrente “auxiliary”, mentre (+) indica la corrente dell’elettrodo “working” (per esempio: S1- indica il pin del segnale relativo alla corrente “auxiliary” del sensore in posizione S1).

Nome del resistore e alias	Funzione	Effetto della sua rotazione oraria
<i>R19 (B1-)</i>	<i>Impostazione del livello di zero dell’ “auxiliary” di S1</i>	<i>Decrementa la tensione di S1-</i>
<i>R14 (B1+)</i>	<i>Impostazione del livello di zero del “working” di S1</i>	<i>Incrementa la tensione di S1+</i>
<i>R37 (B2-)</i>	<i>Impostazione del livello di zero dell’ “auxiliary” di S2</i>	<i>Decrementa la tensione di S2-</i>
<i>R31 (B2+)</i>	<i>Impostazione del livello di zero del “working” di S2</i>	<i>Incrementa la tensione di S2+</i>
<i>R55 (B3-)</i>	<i>Impostazione del livello di zero dell’ “auxiliary” di S3</i>	<i>Decrementa la tensione di S3-</i>
<i>R49 (B3+)</i>	<i>Impostazione del livello di zero del “working” di S3</i>	<i>Incrementa la tensione di S3+</i>
<i>R31 (B4-)</i>	<i>Impostazione del livello di zero dell’ “auxiliary” di S4</i>	<i>Decrementa la tensione di S4-</i>
<i>R67 (B4+)</i>	<i>Impostazione del livello di zero del “working” di S4</i>	<i>Incrementa la tensione di S4+</i>

Tabella 6: nomi dei resistori che regolano la tensione di zero e loro funzione specifica.

6. Test del dispositivo e sua modalità d'uso

La prima operazione da effettuare per un efficace utilizzo del dispositivo è la determinazione dell'ampiezza dell' amplificazione delle correnti prodotte dai sensori. E' consigliabile impostare tale parametro grosso modo uguale in valore per i due segnali "working" e "auxiliary". Determinare l'ampiezza dell' amplificazione, vuol dire, in ultima analisi, determinare il valore resistivo dei resistori variabili elencati nella tabella 5. La formula da usare per calcolare in ohm tale valore è:

$$R = \frac{\Delta V_{max}}{5S_s C_{max}} - 10^5 \quad (1),$$

dove ΔV_{max} è la massima escursione della tensione in uscita espressa in Volts, coincidente con buona approssimazione con la tensione di alimentazione. S_s è la sensibilità del sensore, che può essere espressa in A/ppb o A/ppm, e C_{max} è la massima concentrazione attesa del gas da misurare, che può essere espressa in ppb o ppm, a seconda del parametro S_s . A titolo d'esempio, immaginiamo di voler usare il sensore CO-B4 per misurare la concentrazione di CO, il cui valore massimo atteso ipotizzato è di 10 ppm. Supponiamo che tale sensore abbia $S_s = 500 * 10^{-9}$ A/ppm, e supponiamo di alimentare la B4Amb con 3,5V. Quindi, supponendo di aver montato il sensore nello zoccolo S2, facendo ricorso alla formula (1), regoleremo entrambi i resistori R28 e R35 (vedi tabella 5) ad un valore di 40 Kohm. Per mezzo di un cacciavite e di un ohmetro, potremo quindi impostare tali resistori al valore così calcolato.

Una volta effettuata questa operazione, possono essere montati i sensori, e viene data alimentazione alla scheda. Al loro primo utilizzo è necessario attendere qualche ora (l'esatta quantità di tempo dipende dal tipo di sensore e non è specificata dal costruttore) affinché i segnali in uscita dalla scheda si stabilizzino per via del loro naturale periodo di "warm-up". Il periodo di "warm-up" è eccezionalmente lungo solo al loro primo utilizzo, dopodiché esso decresce a valori di qualche minuto. L'operazione di attesa della stabilizzazione dei segnali va effettuata in una camera di prova dove non vi è presenza del gas "target" del sensore, o comunque in un ambiente dove è noto che vi sia una bassissima concentrazione del suddetto gas. Una volta verificato che i segnali si siano stabilizzati, occorre regolare la tensione di zero dei segnali "working" e "auxiliary", agendo con un cacciavite sui resistori variabili di precisione elencati in tabella 6. Nel caso del segnale "auxiliary", è conveniente impostare tale valore a circa metà della tensione di alimentazione,

mentre per quanto riguarda il segnale “working”, tale tensione dipende dal tipo di sensore che si sta usando. Per esempio, nel caso del CO-B4, il segnale “working” è in relazione inversa con la concentrazione del gas da misurare; viceversa, nel caso del NO2-B43F, riscontriamo una relazione diretta tra le due grandezze. In virtù di queste osservazioni, regoleremo quindi la tensione di zero a valori prossimi alla tensione di alimentazione nel primo caso; viceversa, nel secondo caso, la tensione di zero sarà regolata a valori congruentemente bassi. L’esatto valore delle suddette tensioni può essere tuttavia lasciato a discrezione dell’utente.

Per quanto riguarda invece il test della scheda B4Amb, esso è stato effettuato durante una campagna sperimentale realizzata in ambiente “indoor”, ed esposta in un articolo precedentemente pubblicato [13]. In sintesi, per effettuare il test, un esemplare della scheda B4Amb è stato installato nel monitor portatile denominato “SentinAir”, precedentemente progettato nei nostri laboratori [1,3,4]. I sensori utilizzati in questo esperimento sono il CO-B4, il NO2-B43F, e il OX-B431, rispettivamente per monitorare le concentrazioni in ambiente domestico dei gas CO, NO₂, e O₃. Le finalità di questo studio consistevano nell’individuare l’algoritmo di calcolo migliore per convertire i segnali analogici di tensione in uscita dalla B4Amb in concentrazioni di gas. Per effettuare tale studio, tali segnali sono stati digitalizzati e usati come “input” di alcuni algoritmi di calcolo, insieme a temperatura, umidità, e le concentrazioni di gas reali lette dagli analizzatori chimici collocati negli stessi ambienti. Gli algoritmi di calcolo delle concentrazioni utilizzati nell’ esperimento sono la regressione lineare multivariata, una rete neurale, e due tecniche di “machine-learning” denominate “Random Forest”, e “Support Vector Machine”. Come esposto dettagliatamente nell’articolo pubblicato [13], i risultati migliori si sono ottenuti con la tecnica della regressione lineare multivariata e con la rete neurale.

Va precisato che non è strettamente necessario il ricorso a complessi algoritmi di calcolo per determinare le concentrazioni di gas come è stato fatto nello studio sopra brevemente descritto, anche se va detto che esso permette di raggiungere una maggiore accuratezza. In alternativa, la concentrazione di un gas può anche essere calcolata con la formula:

$$C = G_A(S_{i+} - S_{i-}) + C_0 \quad (2),$$

dove S_{i+} è il segnale di tensione di “working” in uscita dell’ i-esimo sensore (vedi figura 5) espresso in Volts, e S_{i-} è il segnale di tensione “auxiliary” in uscita dall’ i-esimo sensore. Il parametro C_0 è il valore di offset che va determinato

sperimentalmente, e che azzeri la concentrazione del gas nel caso in cui, a concentrazione nulla, si abbiano valori non nulli della differenza tra tensione di "working" e "auxiliary". Il parametro G_A è dipendente dal valore resistivo dei resistori elencati nella tabella 5, e dalla sensibilità del sensore, e ovviamente sarà espresso in ppb/V, o ppm/V. In via teorica, esso può essere calcolato con la formula:

$$G_A = \frac{1}{S_s R_i} \quad (3),$$

dove S_s è la sensibilità del sensore, e R_i è il valore resistivo di uno dei sensori elencati in tabella 5, a seconda dello zoccolo in cui si è montato il sensore in oggetto. La formula (3) può dare solo un valore molto indicativo del parametro G_A , in quanto il costruttore fornisce sempre un intervallo di valori inerenti la sensibilità dei suoi sensori. Infatti, essa può variare significativamente da esemplare a esemplare. Questo dato comporta come conseguenza, la necessità del ricorso a metodi empirici o sperimentali per ricavare il parametro G_A con un' accuratezza più ragionevole.

Esso può essere determinato, per esempio, con il sistema della calibrazione a due punti. Secondo tale procedura, si espone il dispositivo a una concentrazione di gas nota C_1 , e si misura la differenza di tensione ΔS_1 tra le uscite del segnale di "working" e dell' "auxiliary". Successivamente si espone il dispositivo a un'atmosfera avente concentrazione nulla (o estremamente bassa) del gas "target", alla quale corrisponderà ΔS_0 . Ottenuti questi dati, il parametro G_A potrà essere calcolato con la formula:

$$G_A = \frac{C_1}{\Delta S_1 - \Delta S_0} \quad (4).$$

Invece, il parametro C_0 può essere calcolato con l'equazione:

$$C_0 = -G_A \Delta S_0 \quad (5).$$

7. Conclusioni

Una valida alternativa alle tecnologie tradizionali per il monitoraggio della qualità dell'aria in tempo reale è rappresentata dai sensori elettrochimici a basso costo. In particolare, i sensori della Alphasense afferenti alla linea di prodotto "B" sono caratterizzati da un ottimo rapporto qualità/prezzo, e attirano l'attenzione di diversi soggetti coinvolti nel campo del monitoraggio dell'inquinamento atmosferico. L'azienda produttrice di questi sensori distribuisce anche la scheda elettronica ISB di supporto per un loro pronto utilizzo, ma benché essa garantisca un loro immediato

impiego, diversi limiti risultano evidenti a un'attenta analisi delle sue caratteristiche tecniche. Al fine di superare le limitazioni insite nell'elettronica della ISB, una nuova scheda elettronica qui denominata B4Amb è stata progettata e sviluppata. Lo sviluppo di questo nuovo dispositivo si è reso necessario per rispondere più efficacemente alle esigenze caratterizzanti le attività sperimentali del nostro laboratorio. A ciò, si deve aggiungere la mancanza sul mercato di analoghi dispositivi con le caratteristiche tecniche simili alla B4Amb. La scheda elettronica è stata quindi sperimentata in uno studio sugli inquinanti gassosi domestici precedentemente pubblicato [13]. Per effettuare le attività inerenti questo studio, la scheda B4Amb è stata installata in un monitor per il monitoraggio della qualità dell'aria, ed ha permesso di portare a compimento con successo tutte le attività previste. I sensori coinvolti in questo studio, e montati sulla scheda, sono il CO-B4, il NO₂-B43F, e il OX-B431 rispettivamente per il monitoraggio dei gas CO, NO₂, e O₃.

Bibliografia

- [1] Suriano, D.; Cassano, G.; Penza, M., "Design and Development of a Flexible, Plug-and-Play, Cost-Effective Tool for on-Field Evaluation of Gas Sensors", *J. Sens.* **2020**, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8812025>
- [2] Suriano D. et al., "A Portable Sensor System for Air Pollution Monitoring and Malodours Olfactometric Control", *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2012, vol. 109, https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0935-9_15
- [3] Suriano D., "A portable air quality monitoring unit and a modular, flexible tool for on-field evaluation and calibration of low-cost gas sensors", *HardwareX*, 9, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2021.e00198>.
- [4] Suriano D., "SentinAir system software: A flexible tool for data acquisition from heterogeneous sensors and devices", *SoftwareX*, 12, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100589>

[5] Kumar, P., Morawska, L., Martani, C., et al., “The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities”, *Environment International*, 2015, vol. 75, pp. 199–205.

[6] Snyder E.G., Watkins T. H., Solomon P.A., et al., 2013, “The Changing Paradigm of Air Pollution Monitoring”, *Environmental Science and Technology*, vol. 47, no. 20, pp.11369-11377.

[7] N. Castell, F.R. Dauge, P. Schneider, et al., “Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates?”, *Environment International*, 2017, vol. 99, pp. 293-302.

[8] Karagulian, F.; Barbieri, M.; Kotsev, A.; Spinelle, L.; Gerboles, M.; Lagler, F.; Redon, N.; Crunaire, S.; Borowiak, A., “Review of the Performance of Low-Cost Sensors for Air Quality Monitoring”, *Atmosphere*, 2019, 10, 506, <https://doi.org/10.3390/atmos10090506>

[9] sito web del produttore Alphasense: www.alphasense.com

[10] Spinelle, L.; Gerboles, M.; Villani, M.G.; Aleixandre, M.; Bonavitacola, F., “Field calibration of a cluster of low-cost available sensors for air quality monitoring. Part A: Ozone and nitrogen dioxide”, *Sens. Actuators B Chem.* **2015**, 215, 249–257.

[11] Wei, P.; Ning, Z.; Ye, S.; Sun, L.; Yang, F.; Wong, K.C.; Westerdahl, D.; Louie, P.K.K., “Impact Analysis of Temperature and Humidity Conditions on Electrochemical Sensor Response in Ambient Air Quality Monitoring”, *Sensors* **2018**, 18, 59.

[12] Bigi, A.; Mueller, M.; Grange, S.K.; Ghermandi, G.; Hueglin, C., “Performance of NO, NO₂ low cost sensors and three calibration approaches within a real world application”, *Atmos. Meas. Tech.* **2018**, 11, 3717–3735.

[13] Suriano, D.; Penza, M., “Assessment of the Performance of a Low-Cost Air Quality Monitor in an Indoor Environment through Different Calibration Models”, *Atmosphere* **2022**, 13, 567. <https://doi.org/10.3390/atmos13040567>

[14] Zimmerman, N.; Presto, A.A.; Kumar, S.P.N.; Gu, J.; Hauryliuk, A.; Robinson, E.S.; Robinson, A.L.; Subramanian, R., “A machine learning calibration model using random forests to improve sensor performance for lower-cost air quality monitoring”, *Atmos. Meas. Tech.* **2018**, *11*, 291–313.

[15] Kang, Y.; Aye, L.; Ngo, T.D.; Zhou, J., “Performance evaluation of low-cost air quality sensors: A review”, *Sci. Total Environ.* **2022**, *818*, 151769.

[16] sito Arpa Veneto da cui sono estratti I dati riportati in tabella 1: <https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/aria/qualita-dellaria/dati-validati-legenda>

[17] sito nel quale sono archiviati i files di progetto: <https://github.com/domenico-suriano/Alphasense-B4-multisensor-board>