

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

**REALIZZAZIONE DI UN DISPOSITIVO ELETTRONICO PER
L'INTERFACCIAMENTO DI SENSORI ELETTROCHIMICI
DI GAS PER IL MONITORAGGIO DELLA
QUALITA' DELL'ARIA**

RT/2024/10/ENEA



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

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

REALIZZAZIONE DI UN DISPOSITIVO ELETTRONICO PER
L' INTERFACCIAMENTO DI SENSORI ELETTROCHIMICI
DI GAS PER IL MONITORAGGIO DELLA
QUALITA' DELL' ARIA

RT/2024/10/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.

REALIZZAZIONE DI UN DISPOSITIVO ELETTRONICO PER L' INTERFACCIAMENTO DI SENSORI ELETTROCHIMICI DI GAS PER IL MONITORAGGIO DELLA QUALITA' DELL' ARIA

D. Suriano

Riassunto

Negli ultimi anni, l'emergere di nuove tecnologie per la misurazione delle concentrazioni dei gas in ambiente ha introdotto nuovi dispositivi a basso costo disponibili sul mercato. Il loro funzionamento è basato su svariati tipi di sensori caratterizzati da diverse tecnologie che ne determinano il costo finale, ma anche le loro prestazioni. Tra questi, i più promettenti e i più studiati risultano essere senza dubbio i sensori di tipo elettrochimico utilizzati per il monitoraggio della qualità dell'aria, ad integrazione degli strumenti più tradizionali, quali gli analizzatori chimici. Tra i costruttori di tali tipi di sensori operanti a livello globale, la Alphasense si contraddistingue per la sua offerta di prodotti caratterizzati da un interessante rapporto qualità/prezzo. Un filone delle attività del laboratorio "test sensori", sito nel centro ricerche Enea di Brindisi, si è quindi focalizzato nello studio delle prestazioni di tali sensori e dei loro possibili campi applicativi. A tal fine, un dispositivo elettronico per l'interfacciamento e il corretto utilizzo dei suddetti sensori, è stato progettato e realizzato nei nostri laboratori. Esso offre una serie di funzionalità e caratteristiche aggiuntive rispetto al corrispettivo fornito dal produttore dei sensori oggetto di studio, conferendogli una maggiore flessibilità ed adattabilità all' "hardware" già sviluppato e in dotazione al nostro laboratorio.

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

Abstract

In recent years, new emerging technologies for the measurement of gas concentrations provided new low-cost devices available on the global market. Their operation is based on various types of sensors characterized by various technologies influencing their costs and their performance quality. Without any doubt, the most promising and the most studied sensors are the electrochemical ones, which are used also for the air quality monitoring to complement the data provided by the traditional instrumentation, such as, the chemical analyzers. Among the manufacturers of such kind of sensors operating worldwide, the Alphasense brand is featured by its capability to offer products having an interesting quality-price ratio. A branch of the activities characterizing the "Sensor Test Lab", located in the Enea research center of Brindisi, is focused in the study of the performance quality of such sensors and their possible use areas. To this purpose, an electronic device for interfacing and correctly operating these sensors has been designed and implemented in our laboratories. It can offer several additional functionalities compared with the similar device provided by the manufacturer of the sensors considered for our studies. The new functionalities implemented in the device presented in this document give it more flexibility and adaptability to the "hardware" previously developed in our laboratory.

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

INDICE

1. Introduzione.....	7
2. Caratteristiche salienti dei sensori usati per la sperimentazione	8
3. Caratteristiche delle schede elettroniche di supporto fornite dal produttore	10
4. Le specifiche di progetto	10
5. Realizzazione della scheda e sue caratteristiche	12
6. Il firmware del microcontrollore e sue funzioni	16
7. Utilizzo del dispositivo e calibrazione dei sensori	17
8. Test del dispositivo	18
9. Conclusioni	21
Bibliografia	21
Allegati	24

1. Introduzione

Negli ultimi anni, la comparsa sul mercato globale di nuove tecnologie con cui effettuare le misurazioni delle concentrazioni dei gas in ambiente, ha permesso l'introduzione di dispositivi a basso costo il cui funzionamento è basato sulle caratteristiche tecniche dei sensori di gas. Tali dispositivi hanno trovato un impiego sempre maggiore nella misurazione delle concentrazioni degli inquinanti gassosi, e nella valutazione e monitoraggio della qualità dell'aria [1-4]. La spinta all'uso di queste tecnologie trova motivazione in una serie di fattori caratterizzanti gli strumenti tradizionalmente impiegati allo scopo e rappresentati dagli analizzatori chimici. Benché essi costituiscano una solida base su cui far leva per ottenere dati affidabili e accurati sulla concentrazioni degli inquinanti atmosferici, il loro uso comporta uno sforzo non indifferente in termini di spese di manutenzione, spese per il loro acquisto, consumi energetici, e spese per la realizzazione e mantenimento di una adeguata struttura per il loro alloggio [3-5]. Per contro, i dispositivi basati sui sensori per gas, pur non garantendo la stessa accuratezza, sono diventati sempre più attrattivi a causa del loro minore costo (paragonato all'analogo strumento di tipo "analizzatore chimico"), maggiore portabilità, minore ingombro, e bassi consumi energetici [1-7]. Tutti questi aspetti positivi hanno stimolato l'attività di ricerca della comunità scientifica che ha investigato diverse tecniche per ovviare alle limitazioni in termini prestazionali insite in questi apparati [4,6-11].

Su tale area di ricerca si innesta parte delle attività del Laboratorio "Test e caratterizzazione sensori per gas" del Dipartimento SSPT, sito nel centro ENEA di Brindisi [12-16]. Tra i diversi tipi di sensori per gas disponibili sul mercato, rivestono di particolare interesse i sensori di tipo elettrochimico e i dispositivi di monitoraggio della qualità dell'aria basati su di essi. Le attività sperimentali sono volte all'individuazione di tecniche e metodologie che riducano l'errore tra il dispositivo funzionante col sensore e il riferimento costituito dall'analizzatore chimico.

In questo quadro, le attività sperimentali si sono concentrate sui sensori prodotti dalla Alphasense [17], poiché caratterizzati da un ottimo rapporto qualità/prezzo, a cui si aggiunge la loro capacità di poter essere impiegati in dispositivi portatili, essendo di dimensioni molto ridotte. Altra loro importante peculiarità, 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 risoluzione, ed all'influenza di altri parametri ambientali, come temperatura, umidità, e presenza di gas interferenti [3-9].

Entrando più nello specifico, il nostro laboratorio ha prestato particolare attenzione alle prestazioni di due serie di sensori aventi in comune la caratteristica di poter essere utilizzati per il monitoraggio degli inquinanti atmosferici poiché, come dichiarato dal produttore, capaci di offrire una risoluzione sufficiente a poter misurare le concentrazioni che comunemente possono ritrovarsi in ambiente. La serie "B" dei sensori Alphasense offre questa possibilità, stando a quanto espresso dal produttore, pertanto, essa è stata già oggetto di analisi in diverse attività sperimentali del nostro laboratorio [13,16,18], e di altri gruppi di ricerca [7-10]. A tale linea di prodotti, si aggiunge una seconda serie di sensori, che si diversifica dalla precedente, per alcune caratteristiche tecniche e per avere tre elettrodi anziché quattro come interfaccia per l'elettronica di supporto (per maggiori dettagli, vedi il sito web della Alphasense [17]). Per il corretto funzionamento di questi tipi di sensori, e per poterli efficacemente interfacciare con i dispositivi di elaborazione dei segnali e di raccolta dati è necessaria un'opportuna circuiteria elettronica che è implementata in una apposita scheda elettronica. L'azienda produttrice dei suddetti sensori fornisce le schede elettroniche di supporto dedicate ai modelli di sensori di nostro interesse (denominate "4 to 20 mA Digital/Analogue Transmitter Board", vedi per maggior dettagli [19]).

Tali schede permettono il corretto utilizzo dei sensori elettrochimici per cui sono state progettate, e ne garantiscono le prestazioni ottimali; tuttavia, una serie di limitazioni le rende poco adattabili alle esigenze dettate dalle attività sperimentali del nostro laboratorio. Tra esse, la più evidente è rappresentata dalla impossibilità di montare più di un sensore per volta; quindi, al fine di superare tale limite, si è proceduto alla progettazione di una nuova scheda elettronica (denominata "Alpha-2") capace di interfacciare i segnali prodotti da più sensori, permettendo così un più alto grado di miniaturizzazione al dispositivo nel quale essa verrà installata ed utilizzata. L'altra principale ragione per cui si è proceduto alla progettazione della Alpha-2, risiede nel secondo grande limite caratterizzante i dispositivi forniti dalla Alphasense a supporto dei propri sensori. Essi non prevedono la possibilità di poter regolare alcuni parametri elettronici che permetterebbero di poter variare il campo di misurazione delle concentrazioni di gas, e la loro risoluzione. Infatti, il produttore fornisce il sistema formato dal sensore e dalla scheda elettronica di supporto per il suo interfacciamento, già calibrato in fabbrica, precludendo così la possibilità di un suo utilizzo più flessibile e rispondente alle attività sperimentali del laboratorio.

2. Caratteristiche salienti dei sensori usati per la sperimentazione

I sensori compatibili con il dispositivo di interfacciamento descritto in questo documento sono quelli individuati nella tabella 1. Essi sono sensori elettrochimici a tre elettrodi, alcuni dei quali idonei a misurare basse concentrazioni di gas, e quindi usabili per il monitoraggio della qualità dell'aria, e altri idonei a rilevare notevoli concentrazioni di gas, come nel caso di fughe o perdite in impianti industriali.

Sensori	Gas "target"
<i>NO2-A1; NO2-AE</i>	<i>NO₂</i>
<i>O3-AH</i>	<i>O₃</i>
<i>CO-CF; CO-A1; CO-AX; CO-CX; CO-AE; CO-CE; CO-AF</i>	<i>CO</i>
<i>S02-AE; S02-AF</i>	<i>SO₂</i>
<i>H2S-A1; H2S-AF; H2S-AH; H2S-AE</i>	<i>H₂S</i>
<i>H2O2-A1</i>	<i>H₂O₂</i>
<i>HCN-A1</i>	<i>HCN</i>
<i>PH3-A1</i>	<i>PH₃</i>
<i>HCL-A1</i>	<i>HCl</i>
<i>CL2-A1</i>	<i>Cl₂</i>

Tabella 1: sensori utilizzabili con la scheda Alpha-2. Col termine "gas target" si intende la specie chimica per la quale il sensore è stato progettato.

Il dispositivo progettato, sebbene in grado di far funzionare correttamente tutti i modelli dei sensori sopra descritti, è stato pensato per i tipi CO-CX, NO2-A1, H2S-A1, e S02-AF. Infatti, alcuni di essi sono già stati oggetto di sperimentazione da parte di altri gruppi di ricerca [5] che, comparabilmente ai nostri obiettivi, hanno valutato la loro applicabilità nel campo del monitoraggio della qualità dell'aria.

Le celle elettrochimiche costituenti l'elemento sensibile dei sensori sono racchiuse in contenitori le cui dimensioni fisiche sono uguali per tutti i sensori su citati (vedi figura 1). L'interfaccia dei sensori con l'elettronica di supporto è costituita da tre elettrodi denominati: "working", "reference", e "counter". La scheda Alpha-2 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.

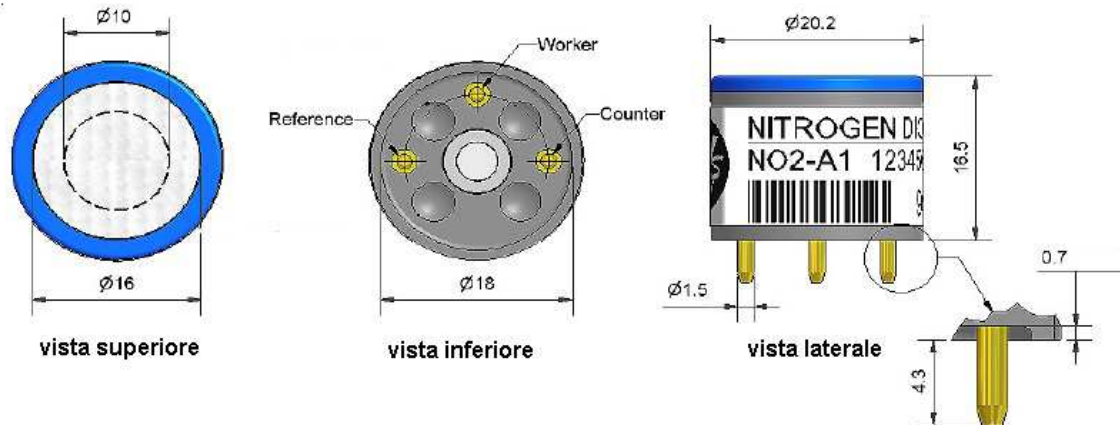


Figura 1: dimensioni fisiche dei sensori NO2-A1, H2S-A1, e SO2-AF espresse in mm. Il sensore CO-CX ha dimensioni identiche, eccetto nell'altezza che è di 23,2 mm.

Le specifiche tecniche dei sensori presi in considerazione sono riassunte nella tabella 2, nella quale sono riportati dei dati estratti dai fogli tecnici dei dispositivi consultabili sul sito del produttore [17]. 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-A1	H2S-A1	CO-CX	SO2-AF
Sensibilità [nA/ppm]	-250/-650	550/900	55/100	300/550
Tempo di risposta [s]	<50	<35	<40	<35
Corrente di zero [ppm equivalenti in aria di zero]	-0,4/+0,4	-0,4/+0,4	-3/+3	-0,6/+0,6
Risoluzione [ppm]	0,02	0,05	0.5	0,1
Intervallo di misura [ppm]	20	100	2000	50
Linearità [ppm]	-1,5/+1,5	0/-4	20/35	-0,3/+0,3

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

Esaminando la tabella 2, o più in generale i fogli tecnici pubblicati dal costruttore dei sensori, si può notare che non compaiono dati circa 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, o concentrazione di gas interferenti, influiscono su sensibilità, corrente di zero e rumore, le quali, a loro volta, determinano l'accuratezza 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 finale del sistema "sensore-scheda elettronica di supporto". Un'altra fonte di errore è rappresentata dalla "cross-sensitivity" o "sensibilità ai gas interferenti" della cella elettrochimica. Sebbene ciascun

tipo di sensore sia progettato e realizzato per uno specifico gas (qui denominato “gas target”), esso risulta essere anche sensibile ad altri tipi di gas, detti interferenti. In altre parole, per esempio, il sensore NO₂-A1 è progettato per misurare il gas NO₂, ma esso risulta essere anche sensibile all’ozono in misura pari a una certa percentuale specificata dal produttore [17], per cui, se lo usassimo in un ambiente con forte presenza di ozono, avremmo delle misure di biossido di azoto affette da un considerevole errore. Gli elementi appena esposti sono alla radice degli errori di misurazione e rappresentano pertanto il limite caratterizzante questa tecnologia.

Alla luce di queste considerazioni, si evince quindi che il progetto della scheda elettronica a supporto dei sensori riveste 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 delle schede elettroniche di supporto fornite dal costruttore

Il costruttore dei sensori produce e distribuisce schede elettroniche dedicate per permettere un pronto utilizzo dei sensori stessi. La gamma dei sensori elencati nella tabella 1 è supportata dalle schede elettroniche denominate “4 to 20 mA Digital/Analogue Transmitter Board”, il cui aspetto fisico è esposto in figura 2.

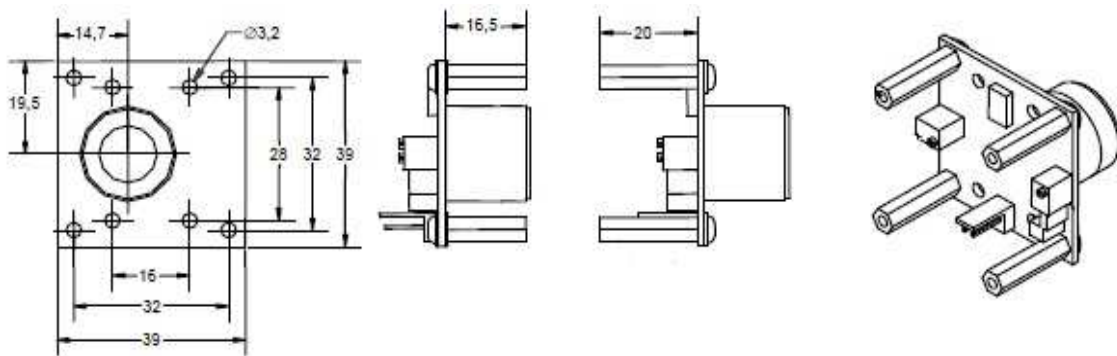


Figura 2: dimensioni (in mm) e aspetto della scheda fornita dal produttore compatibile con i sensori elencati in tabella 1.

Tali schede garantiscono il funzionamento dei sensori fornendo il segnale di uscita relativo alla corrente dell’ elettrodo “working” dal quale si calcolerà la concentrazione di gas rilevata dal sensore. Esse sono alimentabili con una tensione che va da 10V a 30V, e i segnali analogici di uscita sono costituiti da correnti che variano da 4mA a 20mA. Come si può evincere dalla figura 2, tali dispositivi permettono l’utilizzo di un solo sensore per volta, costringendo ad usare più schede per ogni tipo di gas di cui se ne vuole misurare la concentrazione. Come conseguenza, si ha un aumento dei costi della macchina sulla quale si vuole installare i sensori, se ne accresce le dimensioni fisiche e, dovendo impiegare tre cavi per ogni sensore utilizzato (due per l’alimentazione, più uno per il segnale di uscita), si incrementa la lunghezza totale della cavetteria interna alla macchina, il che comporta maggiore rumore elettronico, a discapito della qualità del segnale in uscita dalle schede stesse.

4. Le specifiche del progetto

L’esigenza di superare i limiti insiti nella scheda fornita dalla Alphasense, in aggiunta alle “desiderata” caratterizzanti le attività sperimentali, hanno dettato le specifiche progettuali della nuova scheda Alpha-2, che riassumiamo nei 3 seguenti punti:

- 1) Il progetto della nuova scheda dovrà permettere l’utilizzo di più sensori per volta. I sensori a tre elettrodi di tipo elettrochimico saranno quelli compatibili col suo uso.
- 2) Il guadagno di amplificazione della corrente dell’elettrodo “working” deve poter essere regolabile. Ciò permetterebbe un uso ottimale del sensore, in quanto, aumentando

l'amplificazione, il dispositivo può essere usato in ambienti poco inquinati, o comunque con basse concentrazioni del gas "target"; e diminuendola, permetterebbe un impiego 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. Tale parametro rappresenta la tensione di uscita del dispositivo quando la concentrazione del gas da misurare con uno specifico sensore è nulla, o non rilevabile. La sua regolazione è importante per due ragioni. Da un lato, essa permette sia l'uso di sensori con corrente di uscita proporzionale al gas da misurare, sia l'uso di sensori con corrente di uscita inversamente proporzionale ad esso. Dall'altro lato, la possibilità di poterla regolare garantisce una efficace variazione del campo di misurazione, il che faciliterebbe ulteriormente il duplice utilizzo del dispositivo sia in ambienti fortemente inquinati, ossia dove si riscontrano massicce concentrazioni di gas, sia in ambienti poco inquinati con basse concentrazioni di gas, che necessitano di un considerevole livello di amplificazione delle correnti elettriche dei sensori.
- 4) Il dispositivo dovrà avere un meccanismo di cortocircuitazione automatica degli elettrodi "working" e "reference" in assenza di tensione di alimentazione. La mancanza di tale elemento si tradurrebbe 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. Tale tempo di "warm-up" si incrementa notevolmente se gli elettrodi "working" e "reference" non vengono mantenuti sempre allo stesso potenziale. Tale condizione deve essere soddisfatta anche in mancanze di alimentazione della cella elettrochimica. Per questo motivo, è desiderabile che, a dispositivo disalimentato, i due elettrodi vengano cortocircuitati automaticamente in modo da conservare anche in questa situazione il medesimo potenziale elettrico.
- 5) Il dispositivo dovrà avere le minime dimensioni fisiche, al fine di poterlo integrare in monitor o apparecchi le cui dimensioni possano garantire una certa portabilità.
- 6) La tensione di alimentazione dovrà essere compresa tra 5V e 15V 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 20mA. Tale peculiarità garantirebbe un impiego in dispositivi alimentati a batteria. Al contrario, 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" 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 bassetta ramata a doppia faccia e componentistica elettronica di tipo SMD (Surface Mounted Devices). Questa soluzione ha permesso la realizzazione del dispositivo con le minime dimensioni fisiche (16 cm x 5.5 cm), permettendo anche che la quantità di rumore elettronico di tipo elettromagnetico captato dalla circuiteria sia minima. L'aspetto finale della scheda è raffigurato nelle figure 3 e 4, mentre lo schema elettrico del dispositivo e il "layout" del circuito elettrico sono riprodotti nella parte allegata a questo documento.

Il numero di sensori per gas installabili contemporaneamente sulla scheda è quattro, come si può evincere dalle figure 3 e 4; oltre questi, il dispositivo mette a disposizione anche un sensore di temperatura e uno di umidità relativa. La lista completa dei sensori per gas utilizzabili con la Alpha-2 è esposta nella tabella 1, mentre i sensori di temperatura e umidità utilizzati e saldati direttamente sul PCB sono rispettivamente il TC1047A della Microchip [20] e il HIH5031 della Honeywell [21]. Per quanto riguarda invece le caratteristiche elettriche principali del dispositivo realizzato, esse sono riassunte nella tabella 4.

I files necessari per la progettazione della scheda, compreso lo schema elettrico, sono stati realizzati con il CAD Orcad 10.5.

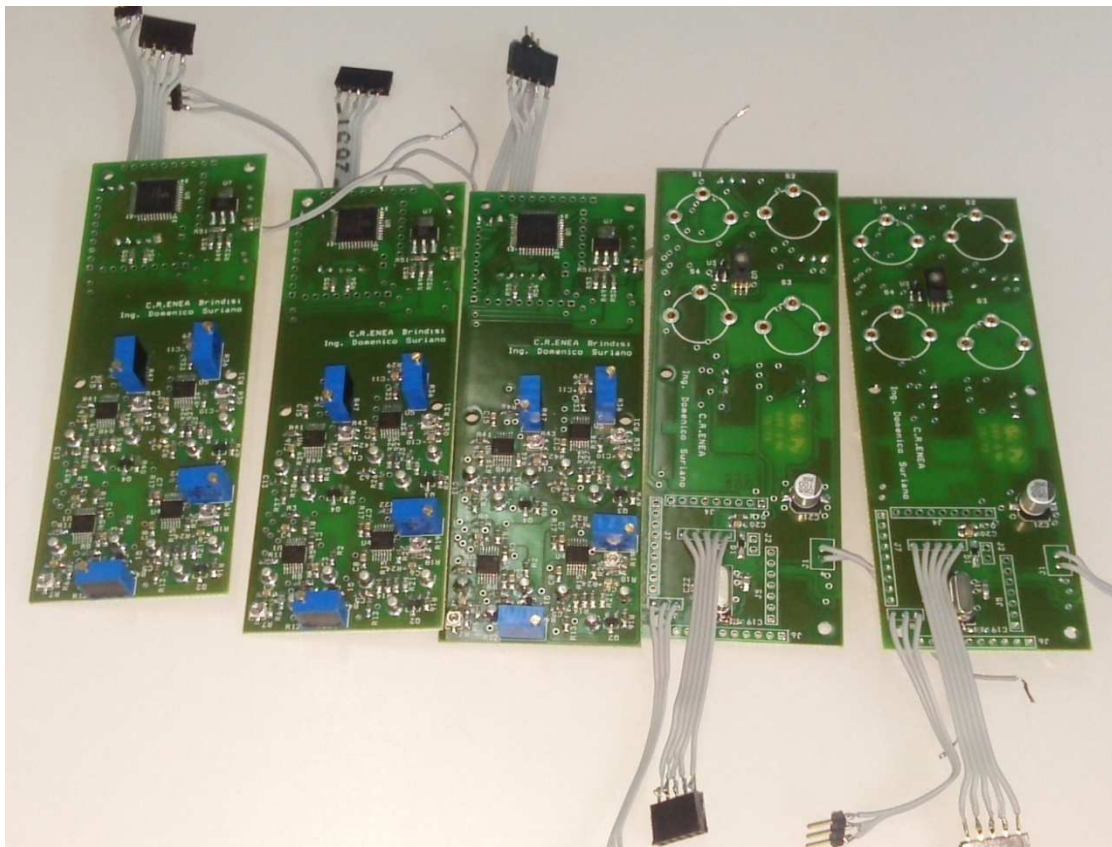


Figura 3: cinque esemplari del dispositivo realizzato. I primi tre a sinistra espongono il lato inferiore, mentre gli ultimi due a destra mostrano il loro lato superiore.



Figura 4: il dispositivo di interfacciamento implementato nel suo aspetto finale con quattro sensori.

Dimensioni	16 cm x 5,5 cm
Tensione di alimentazione	5V - 15V
Massima corrente di assorbimento	15 mA
Guadagno di amplificazione	$0,1 \cdot 10^9$ V/A - $1,1 \cdot 10^9$ V/A
Numero di sensori per gas installabili	4
Tipo di uscita	dati in seriale TTL

Tabella 4: principali caratteristiche della scheda Alpha-2.

La regolazione dell' amplificazione dei segnali viene effettuata agendo con un cacciavite sui resistori presenti sul lato inferiore della scheda individuabili esaminando la figura 5 e la tabella 5, insieme allo schema elettrico in allegato. Parimenti, la tensione di zero viene regolata agendo su altri resistori variabili di precisione, la cui collocazione può essere individuata esaminando la figura 6, la tabella 6 e lo schema elettrico.

Il segnale di uscita del dispositivo, o meglio, la sua interfaccia di comunicazione, consiste in pacchetti di dati inviati sulla porta TTL seriale J8 (vedi figura 6 e schema elettrico), che presenta un elettrodo per la ricezione dei pacchetti seriali ("rx"), uno per la loro trasmissione ("tx"), e un elettrodo di "massa". Il protocollo di comunicazione della porta seriale può essere definito dall'utente programmando opportunamente il microprocessore del dispositivo, e può quindi essere adattato a seconda del tipo di hardware con cui la scheda andrà ad interfacciarsi, assicurando un certo livello di flessibilità. Tale flessibilità è limitata tuttavia da alcune caratteristiche hardware della scheda, le quali fissano i livelli logici bassi e alti in rispettivamente 0V e 3,5V, e il "baud rate" massimo in 115200 bit/secondo. In merito al protocollo di comunicazione, le nostre esigenze di laboratorio hanno portato allo sviluppo di un "firmware" per il processore, con cui si sono implementate le sue caratteristiche, e sul quale verranno forniti dettagli in seguito (vedi paragrafo 6).

Il complesso circuito elettrico del dispositivo, di cui è riportato negli allegati l'elenco completo dei componenti elettronici che lo compongono, può essere schematicamente suddiviso in un blocco "digitale" e un blocco "alimentazione" descritti nella parte 1 allegata, ai quali va aggiunto il blocco "analogico", descritto nelle parti 2,3, e 4 allegate. Il blocco "alimentazione" ha il suo fulcro nel circuito integrato "LM1117MP-ADJ" della "Texas Instruments" [22], che provvede a convertire la tensione di alimentazione in ingresso, compresa tra 5V e 15V, in una tensione pari a 3,5V. Esso provvede inoltre ad erogare tutta la corrente necessaria al funzionamento del circuito, che tipicamente risulta essere pari a 10mA. La parte "digitale" della scheda è invece incentrata sul microcontrollore "PIC18F452" fornito dalla "Microchip", che svolge due funzioni: convertire i segnali analogici provenienti dalla catena di amplificazione dei sensori in dati digitali, e interfacciare il dispositivo con l' "hardware" esterno, al fine

di trasmettere tali dati tramite la porta seriale TTL. La potenza di calcolo del microcontrollore è determinata dal suo "clock" interno, il quale è pilotato dal cristallo piezoelettrico X1 a 10 Mhz. Al fine di svolgere le sue funzioni, il microcontrollore necessita di essere programmato con un "firmware" tramite lo zoccolo J3 denominato "icsp" (vedi anche figura 6).

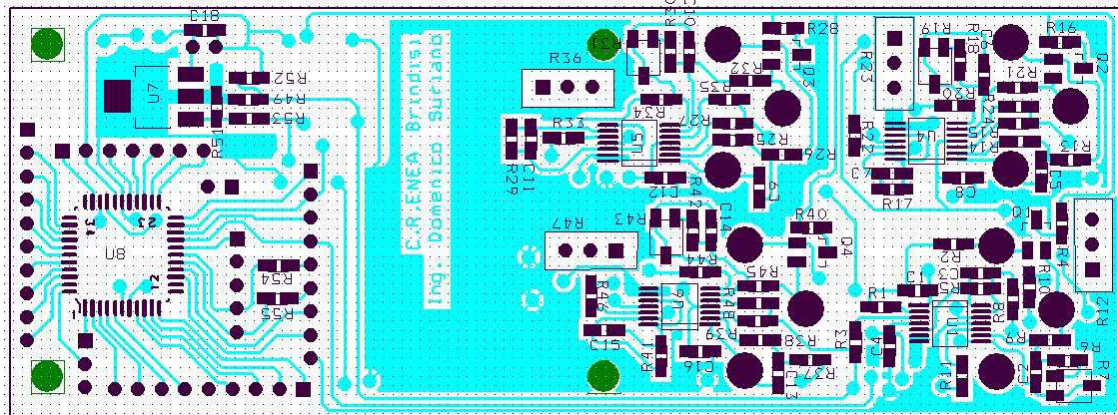


Figura 5: una vista del lato inferiore della scheda dove sono individuabili i resistori variabili per la regolazione dell'amplificazione e della corrente di zero.

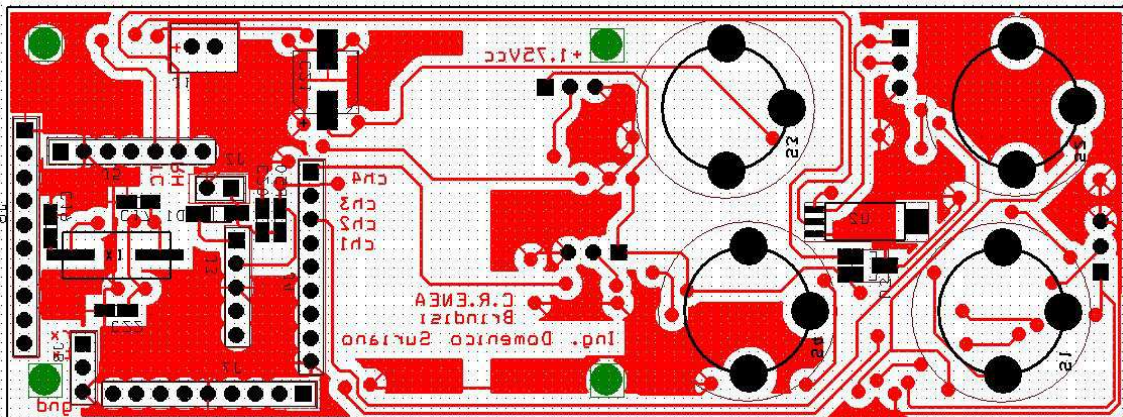


Figura 6: vista del lato superiore della scheda dove si evincono le posizioni degli zoccoli S1, S2, S3, e S4 su cui verranno montati i sensori. In questa figura è individuabile anche il punto di alimentazione della scheda (J1 in alto a sinistra, vedi anche figura 4 e lo schema elettrico allegato), e lo zoccolo a tre poli per prelevare i segnali di uscita (J8 in basso a sinistra, vedi anche figura 4 e lo schema elettrico in allegato). Un altro elemento saliente della scheda è lo zoccolo J3 a cinque poli posizionato sulla parte sinistra, utile per la programmazione del microcontrollore (vedi anche la parte 5 dello schema elettrico).

Nome del resistore	Funzione
R7	Regolazione del guadagno di amplificazione della corrente "working" S1
R19	Regolazione del guadagno di amplificazione della corrente "working" S2
R31	Regolazione del guadagno di amplificazione della corrente "working" S3
R43	Regolazione del guadagno di amplificazione della corrente "working" S4

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

Nome del resistore	Funzione
R12	Impostazione del livello di zero del "working" di S1
R23	Impostazione del livello di zero del "working" di S2
R36	Impostazione del livello di zero del "working" di S3
R47	Impostazione del livello di zero del "working" di S4

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

Il blocco "analogico" del circuito ha invece come base i quattro amplificatori operazionali "AD8574" della "Analog Devices" [23] dedicati al funzionamento dei quattro sensori installabili sulla scheda. Essi

hanno la duplice funzione di amplificare la debole corrente proveniente dall'elettrodo "working" di ciascun sensore, e di pilotare correttamente l'elettrodo "counter", assicurando la stessa tensione per il "working" e il "reference".

L'amplificazione delle correnti dell'elettrodo "working" dei sensori è assicurata dai due stadi in cascata componenti la catena di amplificazione, a cui si aggiunge l'ultimo stadio in uscita che funge da "buffer" del segnale. Il primo stadio dell'"AD8574" relativo a ciascun sensore è configurato in amplificazione di transimpedenza, ed ha nel suo anello di retroazione uno dei resistori variabili elencati in tabella 5, che ne permettono di regolare il livello di amplificazione. Il secondo stadio, posto a valle del primo, è configurato come un amplificatore di tensione invertente nel quale la tensione all'ingresso non invertente è regolabile tramite i resistori variabili elencati nella tabella 6. In questo modo è possibile impostare il livello di "zero" elettronico relativo a ciascun sensore, sia il livello di amplificazione. I condensatori posti in parallelo ai resistori costituenti l'anello di retroazione formano un filtro di primo ordine che contribuisce ad abbattere parte del rumore elettronico del segnale amplificato.

Un altro importante elemento di ciascun ramo del blocco "analogico" del circuito è costituito dai quattro transistor di tipo JFET "MMBFJ177" della "Onsemi" [24]. Essi sono dei transistor ad effetto campo con giunzione positiva che cortocircuitano gli elettrodi "working" e "reference" di ciascun sensore annullando quasi del tutto l'impedenza del loro canale non appena la tensione sul loro elettrodo "gate" si azzerà, ossia quando viene disalimentata la scheda. In questo modo, la tensione tra "working" e "reference" rimane pressoché identica anche quando il dispositivo non è alimentato, garantendo una riduzione del tempo di "warm-up" dei sensori, e di conseguenza, un loro più pronto utilizzo.

6. Il firmware del microcontrollore e sue funzioni

La scheda Alpha-2 è dotata di un microcontrollore al quale sono affidati una serie di compiti che mirano a facilitare l'interfacciamento del dispositivo con l'"hardware" esterno. Essi possono essere schematizzati con estrema sintesi in: conversione dei segnali analogici in uscita dai sensori in formato digitale, filtraggio numerico, interfacciamento del dispositivo con l'"hardware" esterno per mezzo dell'interfaccia "seriale-TTL". Per implementare tali funzionalità, un apposito firmware codificato in linguaggio "C" è stato sviluppato e caricato nella memoria del microcontrollore. L'ambiente di sviluppo utilizzato per la stesura e la compilazione del codice, denominato MPLAB, è fornito dalla Microchip; inoltre, sono state utilizzate inoltre le librerie sviluppate dalla CCS [27] per la serie dei processori PIC18F e integrate nell'ambiente di sviluppo MPLAB.

Negli allegati è possibile visionare l'intero codice che costituisce il firmware del processore, mentre la figura 7 illustra in maniera schematica la sua struttura.

L'intero codice costituente il firmware del microcontrollore è suddiviso in due files (vedi allegati): il principale, denominato "alpha.c", e l'ausiliario, denominato "sensori.h". Nel file principale sono codificate la routine principale (funzione "void main()") e alcune funzioni ausiliarie alla routine principale (funzioni " void invia_misure_ASCII_usb(float * mis)", " void invia_HEADER_USB()", " void rb0_isr()"). Invece, nel file "sensori.h" sono codificate le funzioni in cui è gestito il campionamento, la conversione, e il filtraggio numerico dei segnali dei sensori, insieme ad alcune variabili di programma funzionali alle loro operazioni computazionali. Come si può evincere dalla figura 7, l'architettura del firmware è caratterizzata da un "loop" principale codificato nella funzione "void main()" (vedi codice allegato) che ripete ciclicamente le funzioni di campionamento, conversione e filtraggio dei segnali provenienti dai sensori. Tali funzioni sono codificate nel file "sensori.h" e, per quanto concerne il campionamento e la conversione, esse sono rappresentate dalle "void campionaS1(unsigned int32 * vett,byte * numcamp)", "void campionaS2(unsigned int32 * vett,byte * numcamp)", "void campionaS3(unsigned int32 * vett,byte * numcamp)", "void campionaS4(unsigned int32 * vett,byte *

numcamp)", "void campionaT(unsigned int32 * vett,byte * numcamp)", "void campionaRH(unsigned int32 * vett,byte * numcamp)". Invece, l'operazione di filtraggio numerico dei segnali dei sensori è codificata nella funzione "unsigned long filtro(unsigned int32 * vett, byte dim)", che implementa un filtro a media mobile del segnale con finestra larga 50 campioni nel caso dei sensori per gas, e 5 campioni nel caso dei sensori di temperatura e umidità relativa.

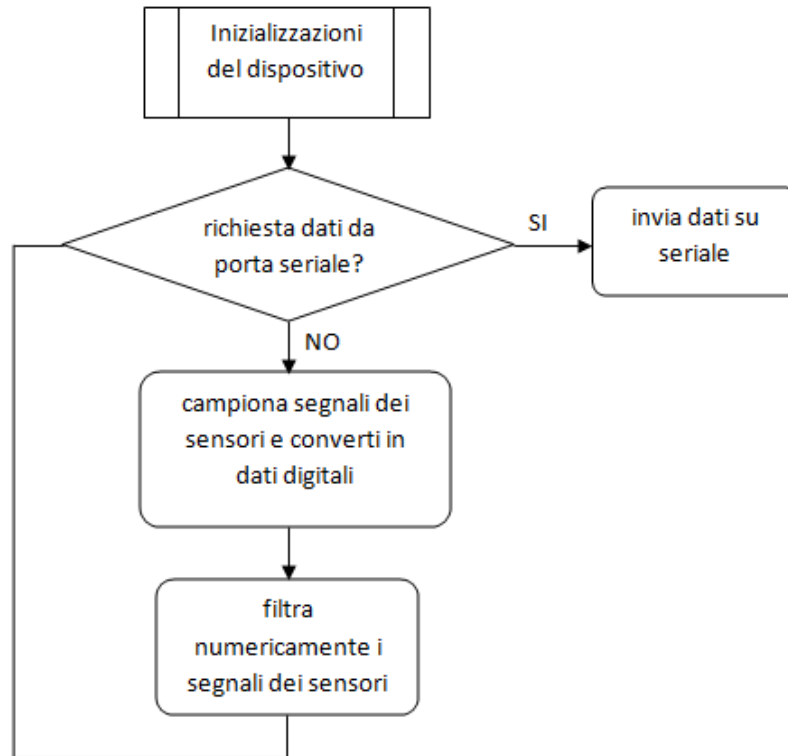


Figura 7: diagramma di flusso del firmware presente nel microcontrollore.

Un meccanismo di "interrupt" interrompe il ciclo principale nel caso in cui dalla porta seriale è in arrivo un comando di richiesta dati, e la gestione di tale "interrupt" è codificata nella funzione " void rb0_isr()". I comandi riconosciuti dal dispositivo sono dei caratteri alfanumerici ai quali esso risponde con una stringa di caratteri alfanumerici secondo lo schema riportato in tabella 7.

Comando	Significato	Risposta del dispositivo
<i>i</i>	<i>richiesta di invio dell'identificativo del dispositivo</i>	<i>Alpha-2</i>
<i>h</i>	<i>richiesta di invio del tipo di misure effettuate dal dispositivo</i>	<i>s1[v];s2[v];s3[v];s4[v];t[c];rh[%]</i>
<i>g</i>	<i>richiesta di invio degli ultimi valori dei sensori</i>	<i>0,1023;1,2345;2,0987;0,7654;23;58</i>

Tabella 7: comandi riconosciuti dal dispositivo e stringa di caratteri alfanumerici inviata. La risposta del dispositivo riportata nel caso del comando "g" è un esempio di una possibile stringa inviata dal dispositivo. Nel caso reale, essa rifletterà gli ultimi valori dei sensori.

Come si può evincere da quanto esposto sinora, l'interfacciamento della scheda "Alpha-2" con l'hardware esterno è implementato secondo lo schema "master-slave". Infatti, il dispositivo fornisce i dati solo se riceverà un comando, e non invierà automaticamente e in maniera ciclica sulla porta seriale alcun tipo di informazione. Il tipo di misure che la scheda fornisce è rappresentato dalle tensioni relative agli elettrodi di "working" di ciascuno dei sensori di gas, dalla temperatura in gradi centigradi, e dalla umidità relativa in valore percentuale. Sarà quindi necessario applicare ai dati relativi alle tensioni in uscita dai sensori un algoritmo, o modello di calibrazione, per trasformare i valori delle suddette tensioni in concentrazioni di gas.

7. Utilizzo del dispositivo e calibrazione dei sensori

Al primo utilizzo del dispositivo, alcune operazioni preliminari sono necessarie per una sua corretta messa in esercizio. Occorre innanzitutto procedere alla programmazione del microcontrollore con il "firmware" necessario al suo funzionamento. Per effettuare tale operazione, si può usare, ad esempio, un programmatore dalla Microchip che carichi nella memoria del microcontrollore PIC18F452 il file derivante dalla compilazione del codice sorgente esposto precedentemente. Per poter programmare il microcontrollore occorre prima alimentare la scheda fornendo tensione allo zoccolo bipolare J1 (vedi figura 6 e schema elettrico allegato) con una tensione che può andare dai 5V ai 15V (vedi tabella 4). A circuito alimentato è poi possibile collegare il programmatore alla scheda tramite lo zoccolo J3 (vedi figura 6 e schema elettrico allegato). Un'altra operazione preliminare necessaria al primo utilizzo di uno specifico sensore è la determinazione del livello di amplificazione della corrente dell'elettrodo "working". Determinare il livello 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:

$$R = \frac{\Delta V_{\max}}{100 S_s C_{\max}} - 10^5 \quad (1),$$

dove ΔV_{\max} è la massima escursione della tensione in uscita (pari a 3,5V), S_s è la sensibilità del sensore, che può essere espressa in nA/ppm, o A/ppm, e C_{\max} è la massima concentrazione attesa del gas da misurare, espressa in ppm. A titolo d'esempio, immaginiamo di voler usare il sensore CO-CX per misurare la concentrazione di CO, il cui valore massimo atteso ipotizzato è di 3 ppm. Supponiamo che tale sensore abbia $S_s = 80 * 10^{-9} A/ppm$. Quindi, ipotizzando di aver montato il sensore nello zoccolo S2, facendo ricorso alla formula (1), regoleremo il resistore R19 (vedi tabella 5) ad un valore di 45,8 Kohm. Per mezzo di un cacciavite e di un ohmetro, potremo quindi impostare tale resistore al valore così calcolato.

Una volta effettuata questa operazione, possono essere montati i sensori, e successivamente può essere fornita 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 dei sensori 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 del segnale "working", agendo con un cacciavite sui resistori variabili di precisione elencati in tabella 6. Tale tensione dipenderà dal tipo di sensore che si sta usando. Per esempio, nel caso del CO-CX, il segnale "working" è in relazione inversa con la concentrazione del gas da misurare; viceversa, nel caso del NO2-A1, riscontriamo una relazione diretta tra le due grandezze. In virtù di queste osservazioni, regoleremo quindi la tensione di zero a valori prossimi a 3,5V 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. Nel caso in cui sul dispositivo siano già state effettuate le operazioni finora descritte, e quindi non si è al primo utilizzo né della scheda, né dei sensori installati, sarà sufficiente dare alimentazione e collegare l'uscita seriale disponibile allo zoccolo J8 con un dispositivo in grado di interfacciarsi opportunamente. Ad esempio, se l'utente ha l'esigenza di registrare i dati provenienti dai sensori su un personal computer, sarà sufficiente utilizzare un adattatore USB/seriale disponibile sul mercato, come il "TTL-232R-3V3-PCB" della FTDI [25], o similari. In alternativa, se l'utilizzo del dispositivo è previsto in accoppiamento con schede "microcomputer", come ad esempio, la

“Raspberry Pi 4” [26], sarà sufficiente collegare direttamente la porta seriale della Alpha-2 con la porta seriale della “Raspberry Pi 4”. Le impostazioni del protocollo seriale che andranno utilizzate si sintetizzano in una velocità di trasmissione/ricezione pari a 115000 baud, 8 bit per byte, nessun bit di parità, 1 bit di stop, nessun controllo di flusso.

Per quanto concerne la calibrazione dei sensori installabili sul dispositivo, va detto che esistono modelli di calibrazione di varia complessità, come ad esempio le regressioni lineari, o le reti neurali artificiali; tuttavia, è possibile ricorrere ad algoritmi molto meno complessi che possono rappresentare un buon punto di partenza, anche se va precisato che il ricorso ad algoritmi di calibrazione più avanzati permette di raggiungere una maggiore accuratezza. In alternativa, la concentrazione di un gas può anche essere calcolata con la formula:

$$C = G_A S_i + C_0 \quad (2),$$

dove S_i è il segnale di tensione di “working” in uscita dell’ i -esimo sensore (vedi figura 4 e 6) espresso in Volts. Il parametro C_0 è invece il valore di offset che va determinato sperimentalmente, e che azzerava la concentrazione del gas nel caso in cui, a concentrazione nulla, si abbiano valori non nulli della tensione di “working”. 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 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 resistori 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 tensione S_1 del segnale di “working”. Successivamente si espone il dispositivo a un'atmosfera avente concentrazione nulla (o estremamente bassa) del gas “target”, alla quale corrisponderà S_0 . Ottenuti questi dati, il parametro G_A potrà essere calcolato con la formula:

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

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

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

8. Test del dispositivo

Il test della scheda Alpha-2 è stato effettuato con lo scopo di verificare che il dispositivo sia in grado di lavorare regolarmente secondo tutte le funzionalità per cui è stato progettato. È importante quindi sottolineare che esso non mira a valutare la prestazione dei sensori nel misurare le varie concentrazioni di gas a cui essi sono esposti, ma a verificare il corretto funzionamento dell'elettronica del dispositivo; pertanto, i risultati esposti in questa sede fanno riferimento alle tensioni relative agli elettrodi “working” dei diversi sensori installati sulla scheda per il test. A tal fine, un esemplare della Alpha-2 è stato introdotto in una camera di prova dove sono state insufflate concentrazioni di gas note intervallate da flussi di aria secca. I dati forniti dal dispositivo sotto test sono stati raccolti in un computer tramite l'adattatore USB “TTL-232R-3V3-PCB” (vedi sezioni 5 e 6)

collegato alla porta seriale del dispositivo stesso. I sensori utilizzati per il test sono il CO-CX, il NO2-A1, il H2S-AF, e il SO2-AF progettati per misurare rispettivamente CO, NO2, H2S, e SO2. La frequenza con cui la porta seriale della scheda è stata interrogata per poter ottenere i dati dei sensori è stata pari a 4 secondi. Le figure 8, 9 10, e 11 riassumono i dati ottenuti tramite questo test.

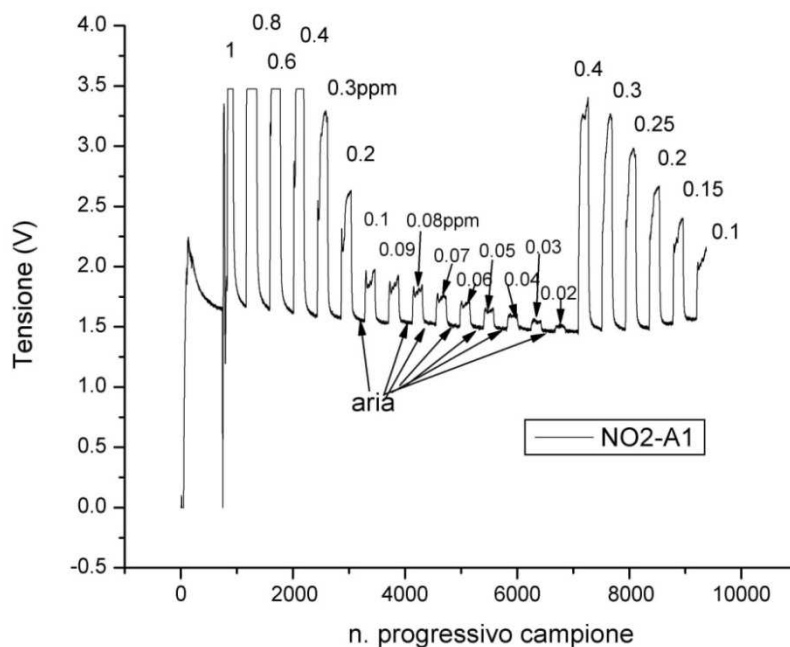


Figura 8: dati relativi al test della scheda Alpha-2 e concernenti il sensore NO2-A1. I valori numerici in figura indicano le concentrazioni di gas NO2 usati nella prova.

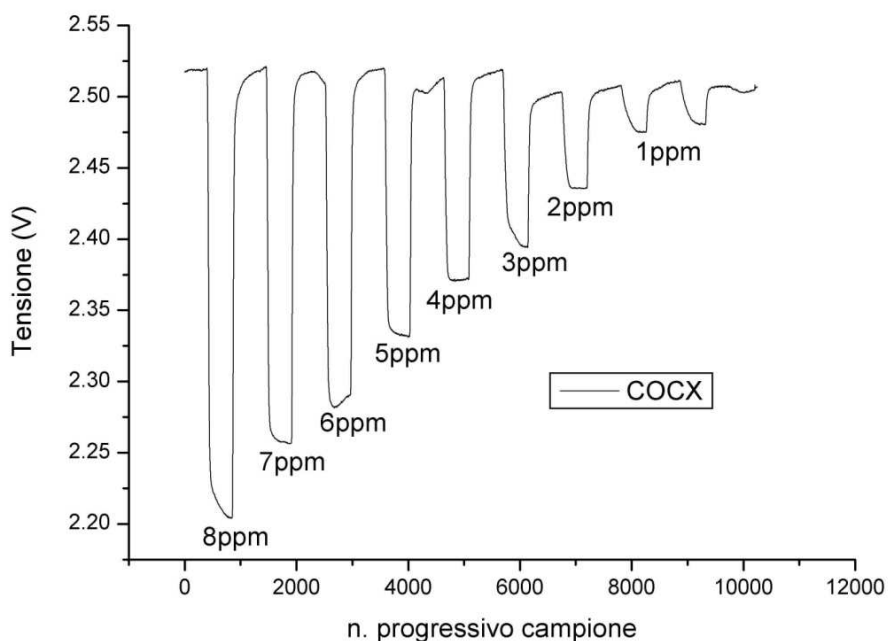


Figura 9: dati relativi al test della scheda Alpha-2 e concernenti il sensore CO-CX. I valori numerici in figura indicano le concentrazioni di gas CO usati nella prova.

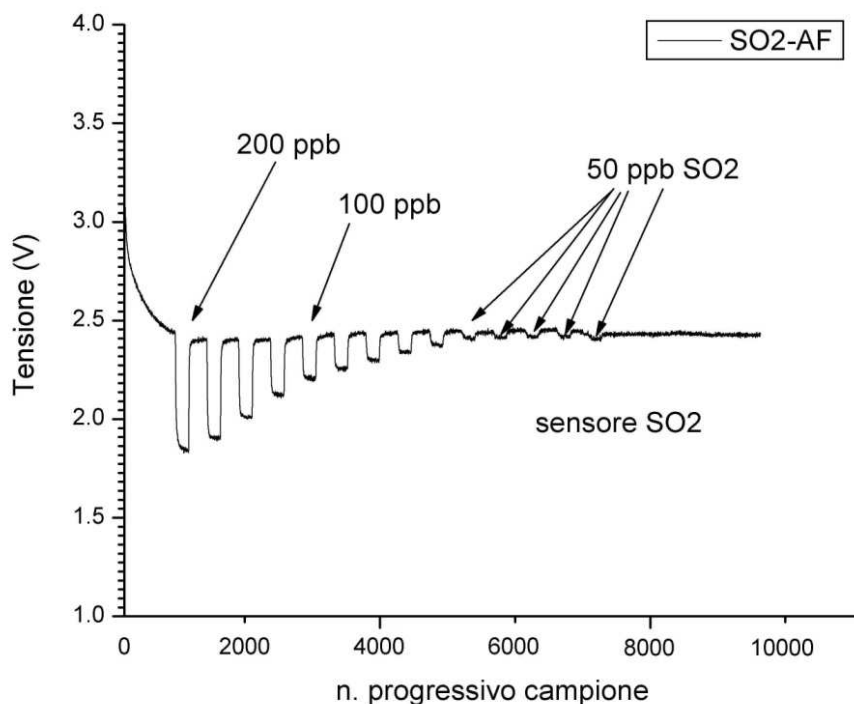


Figura 10: dati relativi al test della scheda Alpha-2 e concernenti il sensore SO2-AF. I valori numerici in figura indicano le concentrazioni di gas SO2 usati nella prova.

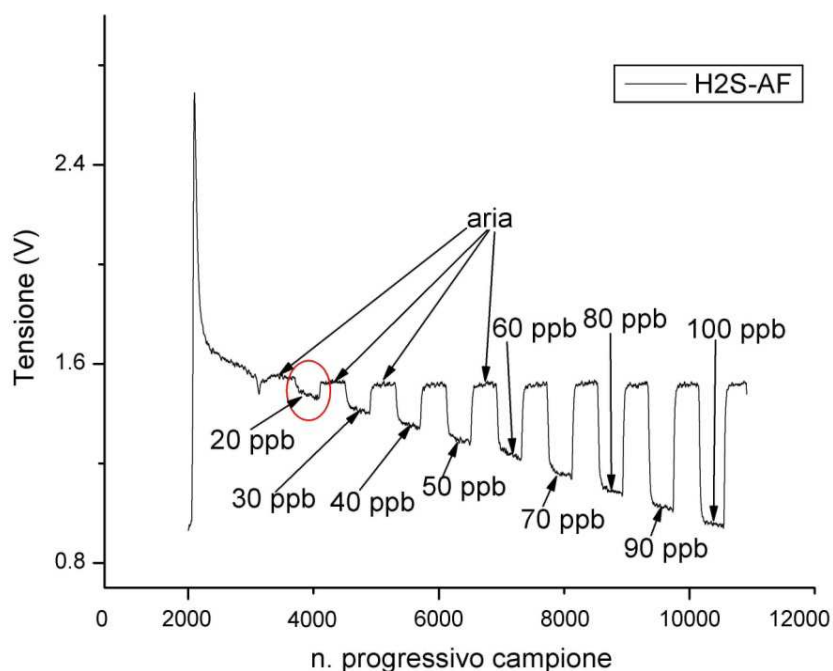


Figura 11: dati relativi al test della scheda Alpha-2 e concernenti il sensore H2S-AF. I valori numerici in figura indicano le concentrazioni di gas H2S usati nella prova.

Le prove effettuate hanno dimostrato che il dispositivo Alpha-2 raggiunge tutti gli obiettivi prefissati in sede di progettazione. Infatti, esaminando le figure 8, 9, 10, e 11, si evince che esso è in grado di garantire livelli di amplificazione dei segnali dei sensori sufficienti alla rilevazione di concentrazioni di gas tipicamente riscontrabili in ambiente esterno. Inoltre, l'elettronica sviluppata per il dispositivo ha provato l'efficacia del suo interfacciamento con l'"hardware" esterno (in questo caso un computer), e affidabilità di funzionamento. A ciò va aggiunto l'esito positivo del test relativo al sistema di regolazione dello "zero" elettronico relativo a ciascun sensore installabile sulla scheda. Come si può evincere dalle figure sopra esposte, esso consente l'impostazione dello "zero" di ciascun canale sensoriale in maniera indipendente, permettendo il contemporaneo utilizzo, sia di sensori con segnale di uscita inversamente proporzionale alle concentrazioni di gas, che necessitano di uno "zero"

elettronico adeguatamente prossimo alla massima tensione di uscita, sia di sensori con segnale di uscita proporzionale alle concentrazioni di gas, che necessitano di uno "zero" elettronico adeguatamente prossimo ai 0 Volts.

9. Conclusioni

Una possibile 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 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 di supporto per un loro pronto utilizzo, ma benché essa garantisca un loro immediato ed efficace impiego, diversi limiti risultano evidenti a un'attenta analisi delle sue caratteristiche tecniche. Al fine di superare tali limitazioni, una nuova scheda elettronica qui denominata Alpha-2 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 tale motivazione, si deve aggiungere la mancanza sul mercato di analoghi dispositivi con le caratteristiche tecniche simili alla Alpha-2. Il dispositivo è stato realizzato in più esemplari e successivamente sottoposto a prove specifiche per la verifica del suo funzionamento. L'esito di queste prove ha dimostrato che la scheda Alpha-2 raggiunge tutti gli obiettivi progettuali per cui essa è stata realizzata.

Bibliografia

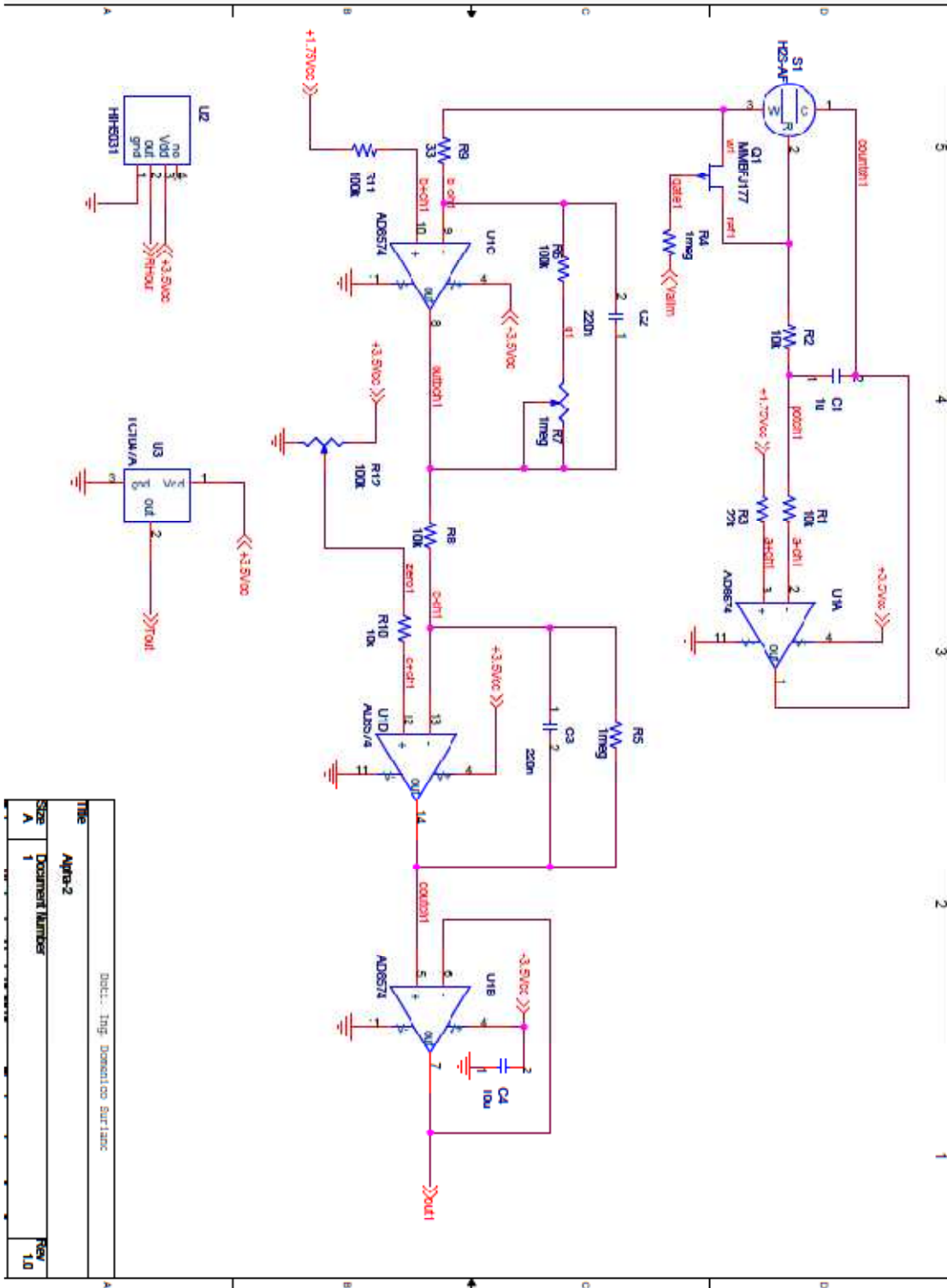
- [1] Kumar, P., Morawska, L., Martani, C., et al., "The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities", *Environment International*, 2015, vol. 75, pp. 199-205.
- [2] Snyder E.G., Watkins T. H., Solomon P.A., et al., 2013, "The Changing Paradigm of Air Pollution Monitoring", *Environmental Science and Technology*, vol. 47, no. 20, pp.11369-11377.
- [3] 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.
- [4] 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>
- [5] Mead, M., Popoola, O., Stewart, G., Landshoff, P., Calleja, M., Hayes, M., Baldovi, J., McLeod, M., Hodgson, T., Dicks, J., Lewis, A. C., Cohen, J., Baron, R., Saffell, J., and Jones, R., "The use of electrochemical sensors for monitoring urban air quality in low-cost, high-density networks", *Atmosphere Environment*, 70, 186-203, 2013.
- [6] Kang, Y.; Aye, L.; Ngo, T.D.; Zhou, J., "Performance evaluation of low-cost air quality sensors: A review", *Science of Total Environment*, 2022, 818, 151769.
- [7] 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", *Sensors and Actuators B Chemical*, 2015, 215, 249-257.

- [8] 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.
- [9] 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", *Atmosphere Measurement Techniques*, 2018, 11, 3717–3735.
- [10] 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", *Atmosphere Measurement Techniques*, 2018, 11, 291–313.
- [11] Francesco Concas, Julien Mineraud, Eemil Lagerspetz, Samu Varjonen, Xiaoli Liu, Kai Puolamäki, Petteri Nurmi, and Sasu Tarkoma, "Low-Cost Outdoor Air Quality Monitoring and Sensor Calibration: A Survey and Critical Analysis", *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2021. <https://doi.org/10.1145/344600>
- [12] 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
- [13] 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. <https://doi.org/10.1155/2020/8812025>
- [14] 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>.
- [15] 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>
- [16] 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>
- [17] sito web del produttore Alphasense: www.alphasense.com
- [18] rapporto tecnico Enea, Suriano D., "Progettazione e realizzazione di una scheda elettronica per sensori elettrochimici di gas inquinanti dell'atmosfera", 2024, <https://hdl.handle.net/20.500.12079/74727>
- [19] pagina web dedicata alle schede di supporto dei sensori Alphasense: https://www.alphasense.com/products?filters=ow_taglist_sm:7ece4e8619a344b3a15d53a007a5ccb5 (ultimo accesso: 9 aprile 2024)

- [20] sito web della Microchip: <https://www.microchip.com> (ultimo accesso: 9 aprile 2024)
- [21] sito web della Honeywell: <https://www.honeywell.com/it/it> (ultimo accesso: 9 aprile 2024)
- [22] sito web della Texas Instruments: <https://www.ti.com> (ultimo accesso: 9 aprile 2024)
- [23] sito web della Analog Devices: <https://www.analog.com/en/index.html> (ultimo accesso: 9 aprile 2024)
- [24] sito web della Onsemi: <https://www.onsemi.com/products/discrete-power-modules/jfets/MMBFJ177> (ultimo accesso: 9 aprile 2024)
- [25] pagina web del sito della FTDI relativa all'adattatore TTL-232R-3V3-PCB: <https://ftdichip.com/products/ttl-232r-3v3-pcb/> (ultimo accesso: 9 aprile 2024)
- [26] pagina web della scheda "Raspberry Pi 4": <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b> (ultimo accesso: 9 aprile 2024)
- [27] sito web della CCS: <https://www.ccsinfo.com/> (ultimo accesso: 9 aprile 2024)

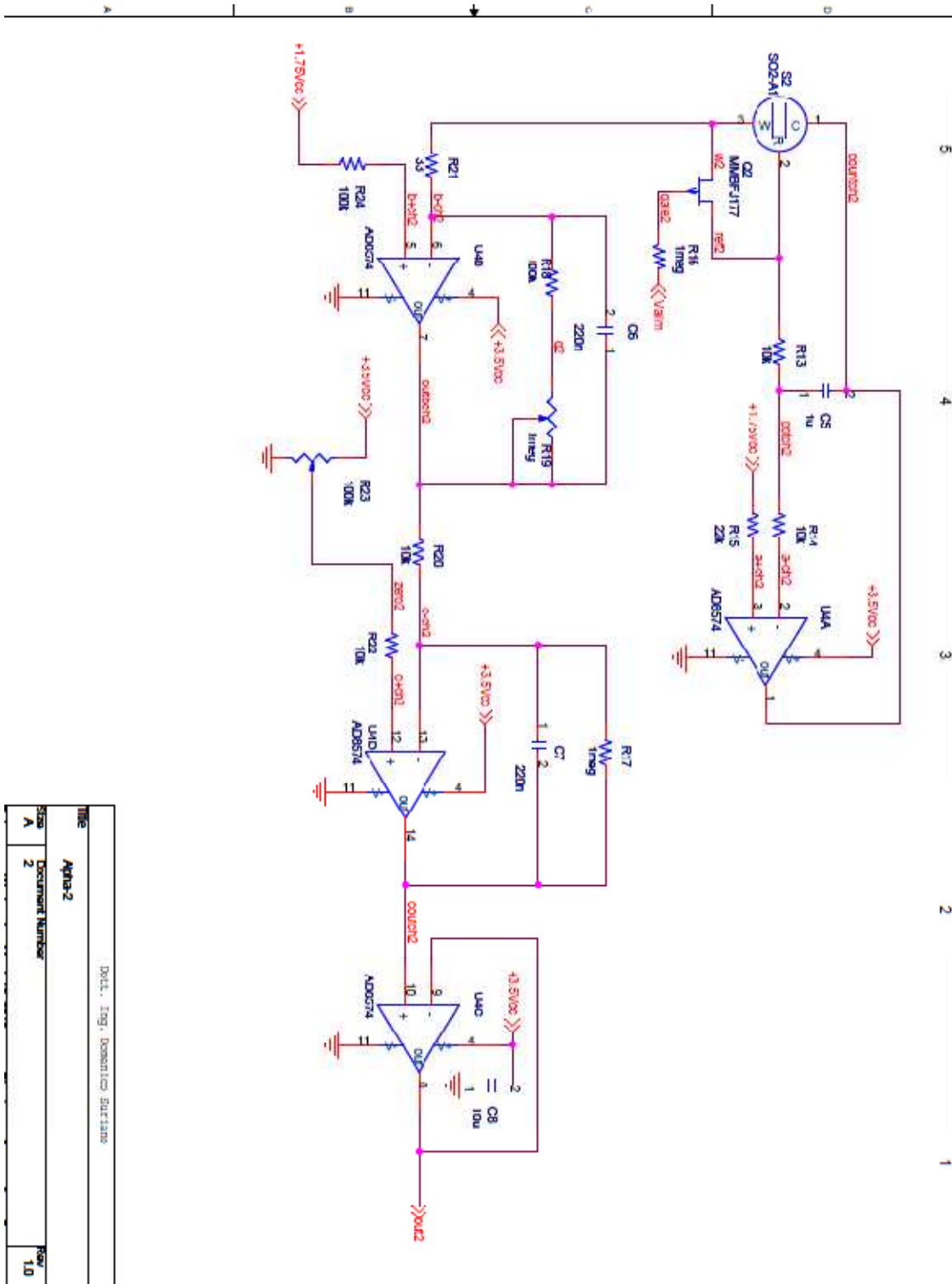
ALLEGATI

Schema elettrico parte 1:



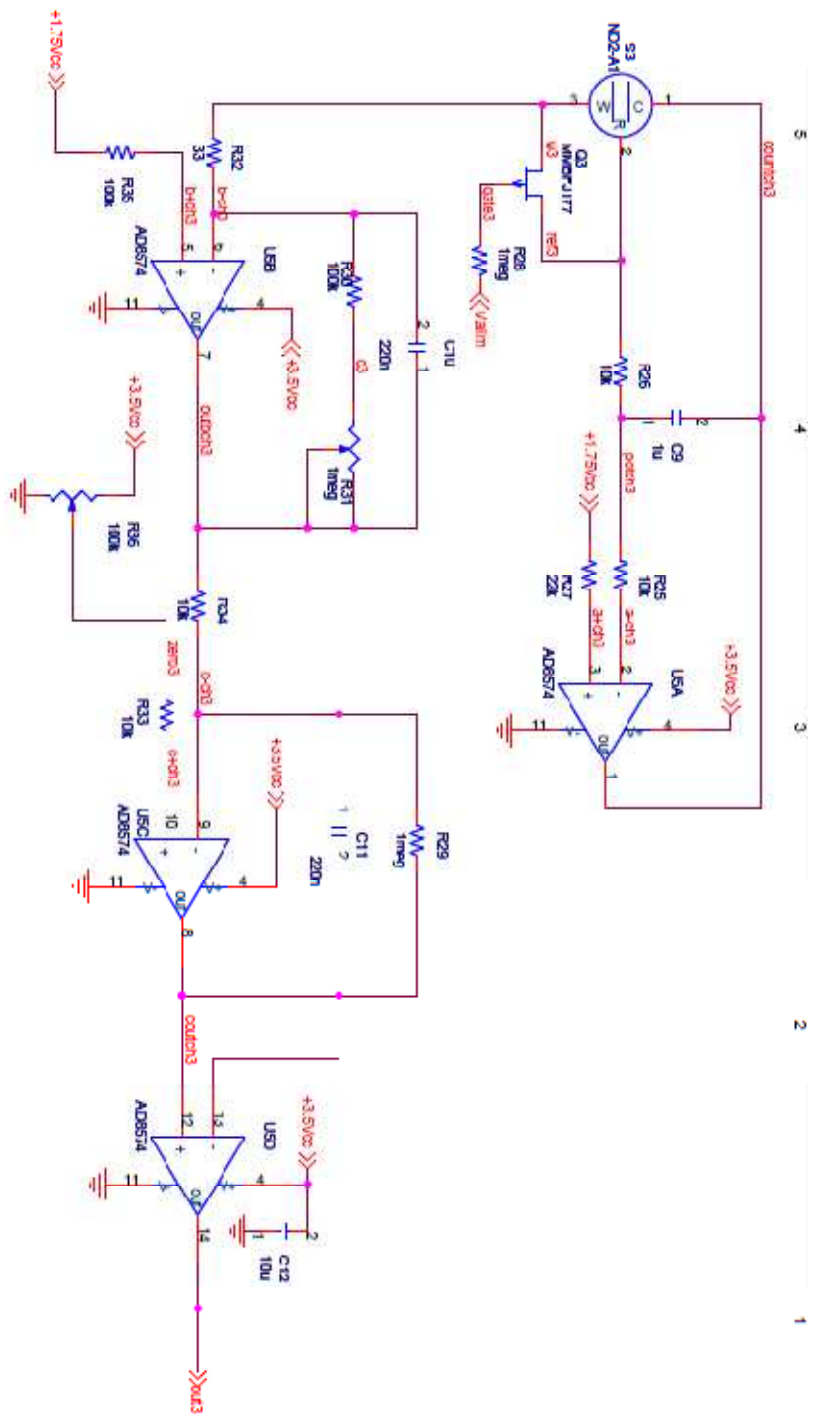
Doc: Ing. Domenico Surrano	
Titolo	Alpha-2
Size	Document Number
A	1
Rev	1.0

Schema elettrico parte 2:



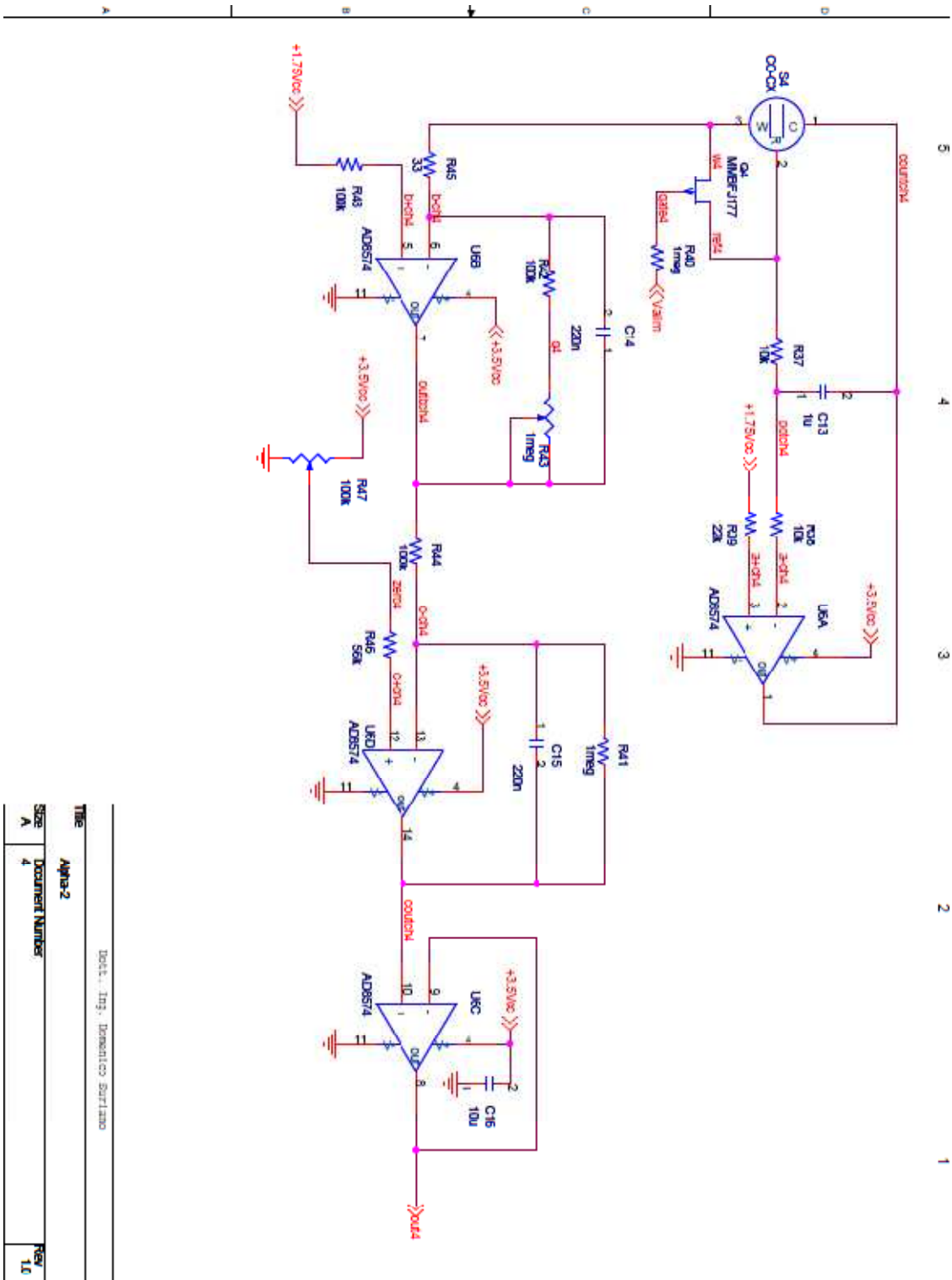
TITolo		Alpha-2	
Descrizione		Document Number	
Scale	A	Page	10
Sheet	2		

Schema elettrico parte 3:



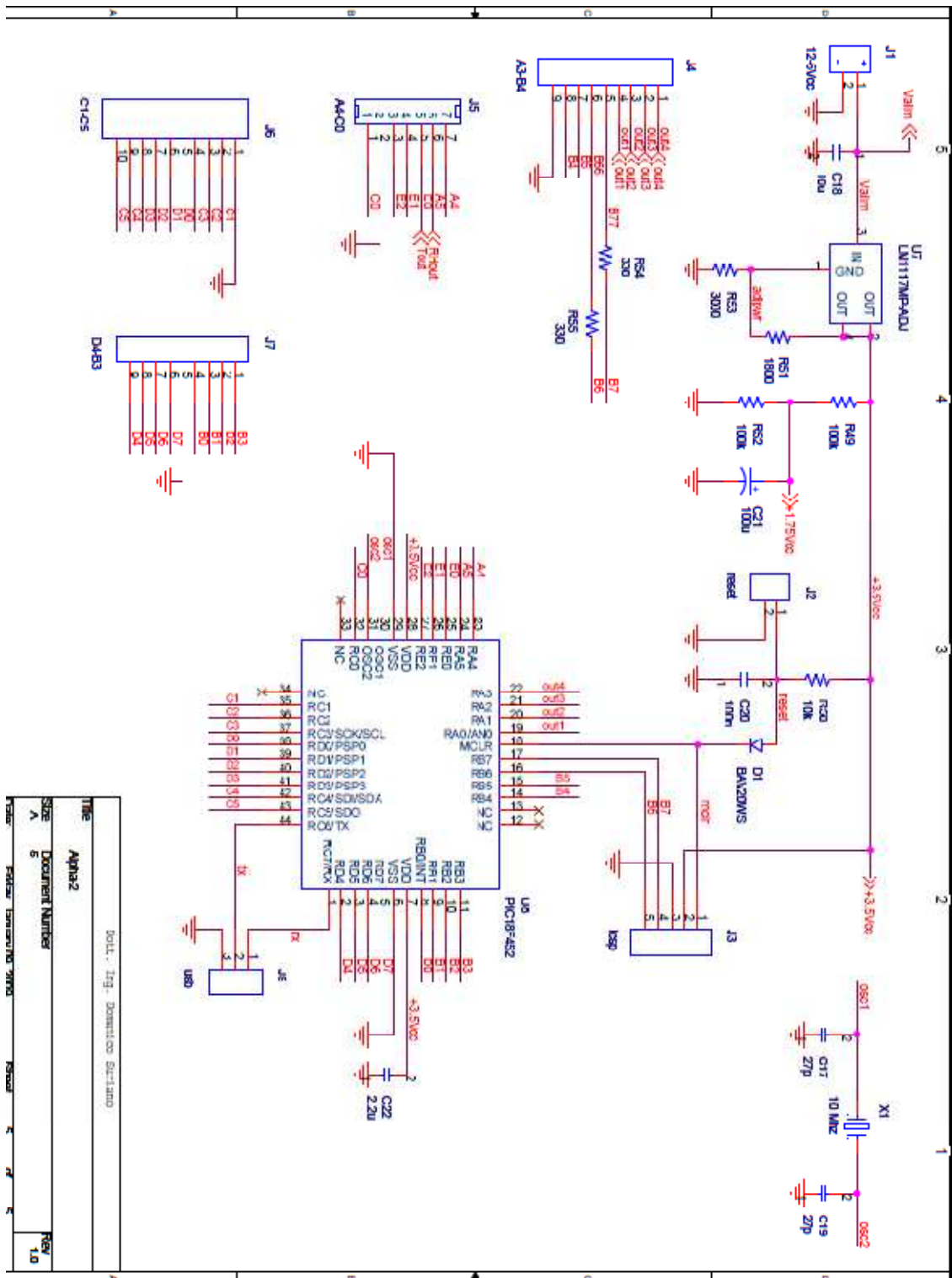
Doc. Ing. Domenico Burlano	
TITolo	Alpha-2
Versione	3
Revisione	1.0

Schema elettrico parte 4:



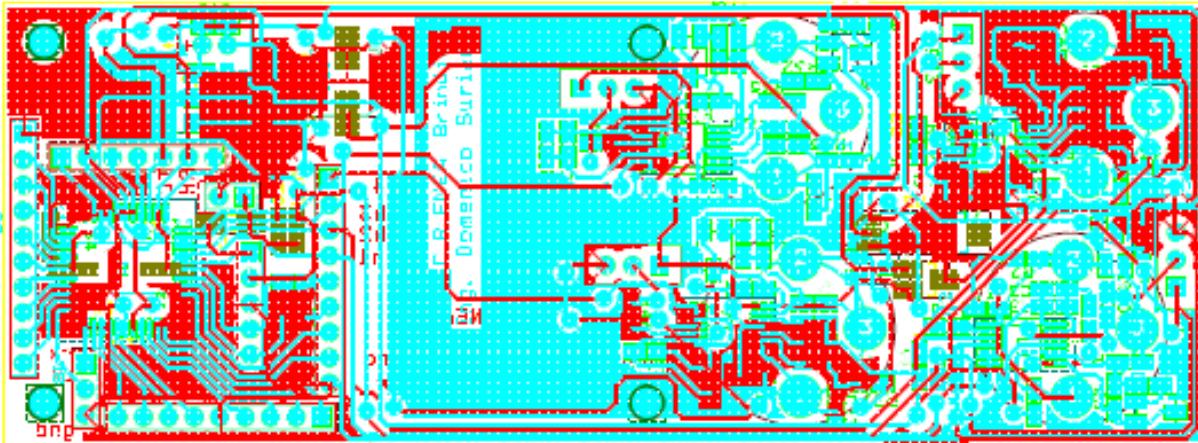
Doc: Ing. Domenico Sartano	
Title	Alpha-2
Size	Document Number
A	4
Rev	1.0

Schema elettrico parte 5:

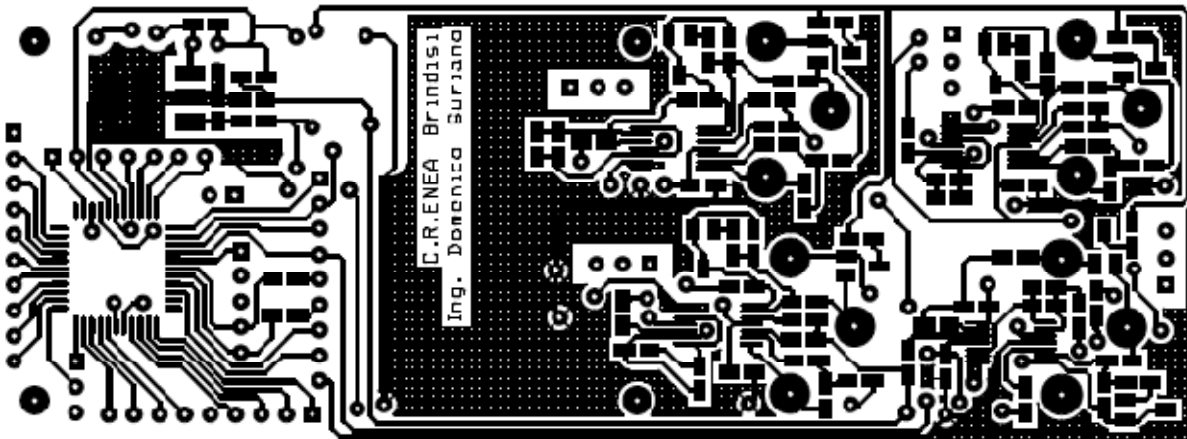


Title		Alpha2	
Doc. Number		Document Number	
Scale		A	
Revision		5	
Author		Fidelio	
Date		1.0	

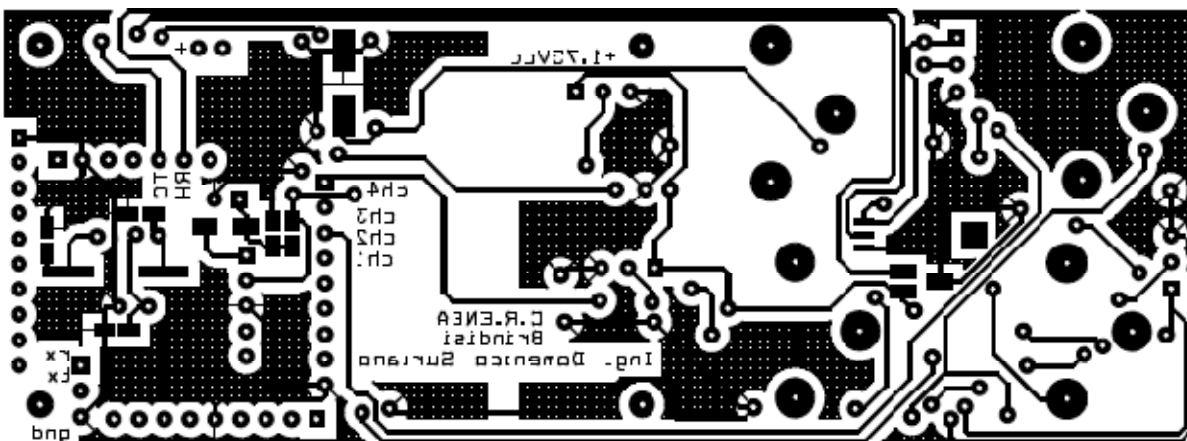
Layout del circuito elettrico (vista globale):



Layout delle piste del circuito elettrico del lato superiore:



Layout delle piste del circuito elettrico del lato inferiore:



Elenco dei componenti elettronici utilizzati nel circuito elettrico:

1	C1	1U
2	C2	220N
3	C3	220N
4	C4	10U
5	C5	1U
6	C6	220N
7	C7	220N
8	C8	10U

9	C9	1U
10	C10	220N
11	C11	220N
12	C12	10U
13	C13	1U
14	C14	220N
15	C15	220N
16	C16	10U
17	C17	10U
18	C18	27P
19	C19	27P
20	C20	100u
21	C21	100n
22	C22	2.2u
23	D1	BAV20WS
24	J1	12-6Vcc
25	J2	reset
26	J3	ICSP
27	J4	A3-B4
28	J5	A4-C0
29	J6	C1-C5
30	J7	D4-B3
31	J8	usb
32	Q1	MMBFJ177
33	Q2	MMBFJ177
34	Q3	MMBFJ177
35	Q4	MMBFJ177
36	R1	10K
37	R2	10K
38	R3	22K
39	R4	1MEG
40	R5	1MEG
41	R6	100K
42	R7	1MEG
43	R8	10K
44	R9	33
45	R10	10K
46	R11	100K
47	R12	100K
48	R13	10K
49	R14	10K
50	R15	22K
51	R16	1MEG
52	R17	1MEG
53	R18	100K
54	R19	1MEG
55	R20	10K
56	R21	33
57	R22	10K
58	R23	100K
59	R24	100K
60	R25	10K
61	R26	10K
62	R27	22K

63	R28	1MEG
64	R29	1MEG
65	R30	100K
66	R31	1MEG
67	R32	33
68	R33	10K
69	R34	10K
70	R35	100K
71	R36	100K
72	R37	10K
73	R38	10K
74	R39	22K
75	R40	1MEG
76	R41	1MEG
77	R42	100K
78	R43	1MEG
79	R44	100K
80	R45	33
81	R46	56k
82	R47	100K
83	R48	100K
84	R49	100K
85	R50	10K
86	R51	2200
87	R52	100K
88	R53	3600
89	R54	330
90	R55	330
91	S1	H2S-AF
92	S2	SO2-A!
93	S3	NO2-A1
94	S4	CO-CX
95	U1A	AD8574
96	U1B	AD8574
97	U1C	AD8574
98	U1D	AD8574
99	U2	HIH5031
100	U3	TC1047A
101	U4A	AD8574
102	U4B	AD8574
103	U4C	AD8574
104	U4D	AD8574
105	U5A	AD8574
106	U5B	AD8574
107	U5C	AD8574
108	U5D	AD8574
109	U6A	AD8574
110	U6B	AD8574
111	U6C	AD8574
112	U6D	AD8574
113	U7	LM1117MP-ADJ
114	U8	PIC18F452
115	X1	10 MHZ

Codice in "C" del firmware presente nella memoria del microcontrollore:

FILE "alpha.c"

```
//configurazione hardware e compilatore
#include <18F452.h>
#define ADC=16 //RISOLUZIONE ADC
#define fuses H4,WDT128,NOPROTECT,NOLVP//NOWDT
#define use delay(clock=40M,oscillator=10M)
#define use rs232(baud=115200,xmit=PIN_C6,rcv=PIN_C7,timeout = 1500,stream=usb)
#include "C:\progetti\firmware-alpha-2\sensori.h"
#define IDENTITY "Alpha-2\r\n"
#define BUFFER_LENGTH 10

//dichiarazione variabili globali
static byte buffer_index;
static byte buffer_counter;
static byte usb_buffer_pointer;
static BYTE usb_rx_buf[BUFFER_LENGTH];
static float misure[6];

// definizione dei pacchetti dati in uscita

void invia_misure_ASCII_usb(float * mis)
{
    fprintf(usb,"%4.4f;%4.4f;%4.4f;%4.4f;%3.1f;%3.1f\r\n",
        mis[0],mis[1],mis[2],mis[3],mis[4],mis[5]);
}

void invia_HEADER_USB()
{
    disable_INTERRUPTS(INT_RDA);
    fprintf(usb,"s1[v];s2[v];s3[v];s4[v];t[c];rh[%%]\r\n");
    enable_INTERRUPTS(INT_RDA);
}

// gestione porta seriale
#define int_rda
void rb0_isr()
{
    disable_INTERRUPTS(INT_RDA);
    usb_rx_buf[buffer_index]=fgetc(usb);
    buffer_index++;
    if(buffer_index==BUFFER_LENGTH)buffer_index = 0;
    enable_INTERRUPTS(INT_RDA);
}
```

```

void main()
{
byte stepS1;
byte stepS2;
byte stepS3;
byte stepS4;
byte stepT;
byte stepRH;
unsigned long sensS1;
unsigned long sensS2;
unsigned long sensS3;
unsigned long sensS4;
unsigned long sensT;
unsigned long sensRH;
float tempBias;
float tempSens;
float RHBias;
float RHsensitivity;
float V33;
float pwr33V;
port_b_pullups(true);
enable_INTERRUPTS(INT_RDA);
enable_interrupts(GLOBAL);

init:
buffer_index = 0;
buffer_counter = 0;
stepS1 = 0;
stepS2 = 0;
stepS3 = 0;
stepS4 = 0;
stepT = 0;
stepRH = 0;
tempBias=0.5;
tempSens=100;
RHBias=0.1515;
RHsensitivity=157.23270440251572327044025157233;
V33 = 0.000049896240234375;
pwr33V = 3.27;

setup_adc_ports(ALL_ANALOG);
setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);

ciclo:
if(buffer_index!=buffer_counter)
{
    if(buffer_index==0){usb_buffer_pointer = BUFFER_LENGTH-1;}

```

```

else{usb_buffer_pointer = buffer_index-1;}
switch ( usb_rx_buf[usb_buffer_pointer]){
case 'i':
    disable_INTERRUPTS(INT_RDA);
    fprintf(usb,IDENTITY);
    enable_INTERRUPTS(INT_RDA);
    break;
case 'h':
    disable_INTERRUPTS(INT_RDA);
    invia_HEADER_USB();
    enable_INTERRUPTS(INT_RDA);
    break;
case 'g':
    disable_INTERRUPTS(INT_RDA);
    invia_misure_ASCII_usb(misure);
    enable_INTERRUPTS(INT_RDA);
    break;
}
buffer_counter = buffer_index;
}

campionaS1(preS1,&stepS1);
campionaS2(preS2,&stepS2);
campionaS3(preS3,&stepS3);
campionaS4(preS4,&stepS4);
campionaT(preT,&stepT);
campionaRH(preRH,&stepRH);

sensS1 = filtro(preS1,N_S1);
sensS2 = filtro(preS2,N_S2);
sensS3 = filtro(preS3,N_S3);
sensS4 = filtro(preS4,N_S4);
sensT = filtro(preT,N_T);
sensRH = filtro(preRH,N_RH);

misure[4]=(((float)sensT*V33)-tempBias)*tempSens;
misure[5]=((((float)sensRH *V33)/pwr33V)-RHBias)*RHSensitivity;
misure[0]=(float)sensS1*V33;
misure[1]=(float)sensS2*V33;
misure[2]=(float)sensS3*V33;
misure[3]=(float)sensS4*V33;

goto ciclo;
}

```

FILE "sensori.h"

```
#define N_S1 50
#define N_S2 50
#define N_S3 50
#define N_S4 50
#define N_T 5
#define N_RH 5
```

```
static unsigned int32 preS1[N_S1];
static unsigned int32 preS2[N_S2];
static unsigned int32 preS3[N_S3];
static unsigned int32 preS4[N_S4];
static unsigned int32 preT[N_T];
static unsigned int32 preRH[N_RH];
```

```
void campionaS1(unsigned int32 * vett, byte * numcamp)
{
    set_adc_channel(0);
    delay_ms(1);
    vett[*numcamp] = (int32)read_adc();
    (*numcamp)++;
    if((*numcamp) > (N_S1-1)) {(*numcamp) = 0;}
}
```

```
void campionaS2(unsigned int32 * vett, byte * numcamp)
{
    set_adc_channel(1);
    delay_ms(1);
    vett[*numcamp] = (int32)read_adc();
    (*numcamp)++;
    if((*numcamp) > (N_S2-1)) {(*numcamp) = 0;}
}
```

```
void campionaS3(unsigned int32 * vett, byte * numcamp)
{
    set_adc_channel(2);
    delay_ms(1);
    vett[*numcamp] = (int32)read_adc();
    (*numcamp)++;
    if((*numcamp) > (N_S3-1)) {(*numcamp) = 0;}
}
```

```
void campionaS4(unsigned int32 * vett, byte * numcamp)
{
    set_adc_channel(3);
```

```

    delay_ms(1);
    vett[*(numcamp)]=(int32)read_adc();
    (*(numcamp))++;
    if(*(numcamp)>(N_S4-1)){*(numcamp)=0;}
}

void campionaRH(unsigned int32 * vett,byte * numcamp)
{
    set_adc_channel(4);
    delay_ms(1);
    vett[*(numcamp)]=(int32)read_adc();
    (*(numcamp))++;
    if(*(numcamp)>(N_RH-1)){*(numcamp)=0;}
}

void campionaT(unsigned int32 * vett,byte * numcamp)
{
    set_adc_channel(5);
    delay_ms(1);
    vett[*(numcamp)]=(int32)read_adc();
    (*(numcamp))++;
    if(*(numcamp)>(N_T-1)){*(numcamp)=0;}
}

unsigned long filtro(unsigned int32 * vett, byte dim)
{
    byte count;
    unsigned int32 meas;
    meas = 0;
    for(count=0;count<dim;count++) meas = meas + vett[count];
    meas = meas/(int32)dim;
    return (unsigned long)meas;
}

```

ENEA
Servizio Promozione e Comunicazione
www.enea.it

Stampa: Laboratorio Tecnografico ENEA - C.R. Frascati
luglio 2024