



Progetto: Sistema avanzato per il monitoraggio ed il controllo della Qualità dell'aria indoor GrIN-BOX

Rapporto tecnico Conclusivo, 30/06/2023

Autori

Zampetti E., Mancuso M. A., Capocecera A., Papa P., Torre M., Macagnano A., Bearzotti A., Santoro S., Balducci C., Tratzi P., Montagnoli M., Vichi F., Berti S., Bianconi D.

Il presente rapporto tecnico riporta tutte le attività e i risultati inerenti I differenti WP del progetto focalizzandosi sul periodo 1/03/2023 – 30/06/2023.

WP1

Sviluppo del prototipo, software di gestione ed integrazione

Come descritto nel precedente rapporto tecnico (attività di progettazione 10/2021 – 2/2022), il sistema di monitoraggio è composto da un modulo sensori chimici, un modulo per la misura delle polveri e un modulo di controllo (Main Electronic Unit –MEU) come raffigurato in figura 1 a,b. Ogni modulo è stato sviluppato seguendo le specifiche di progettazione e apportando eventuali modifiche rivolte ad ulteriori ottimizzazioni. Il primo modulo fabbricato è stato quello che comprende i tre sensori elettrochimici più il sensore PID per i composti organici volatili (VOC). Come da progetto sono stati scelti sensori della Alphasense.

c/o Area della Ricerca Roma 1

Strada Provinciale 35d, 9 – 00010, Montelibretti (RM), Italia

Tel.: +39.06.90672815/454 - Pec: protocollo.iaa@pec.cnr.it

Web: www.iaa.cnr.it - E-mail: segreteria.direzione@iaa.cnr.it

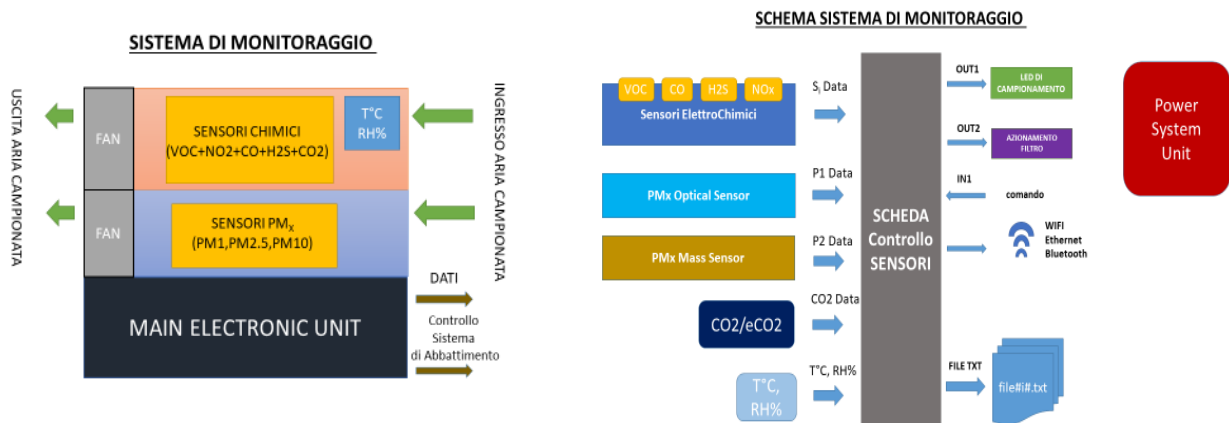


FIG.1. a) Macro blocchi del sistema di monitoraggio inquinanti indoor. b) Schema a blocchi funzionali del sistema di monitoraggio inquinanti indoor.

I sensori elettrochimici necessitano di un'elettronica di prossimità per convertire il segnale di corrente (della cella elettrochimica) in un segnale di tensione misurabile dal canale ADC (16 bit) della MEU. Il sensore PID al contrario ha come uscita un segnale di tensione con livelli compatibili con il canale del convertitore. Inoltre, allo scopo di garantire flussi di campionamento corretti e stabili nel tempo, anche se le condizioni climatiche ambientali variano (come velocità/direzione del vento, pressione, ...) è stata progettata una camera di flusso per i tre sensori chimici e per il sensore di VOC (figura 2).

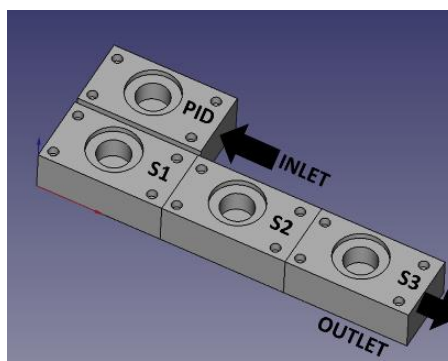


FIG.2. CAD delle camere dei sensori elettrochimici con accoppiata camera di flusso per il sensore PID.

Il prototipo è stato ricavato scavando dal pieno un blocco di materiale inerte in fluoro-polimero, il risultato è mostrato in figura 3. L'inlet sarà collegato ad una mini pompa DC operante con flussi minori di 1 L/min.

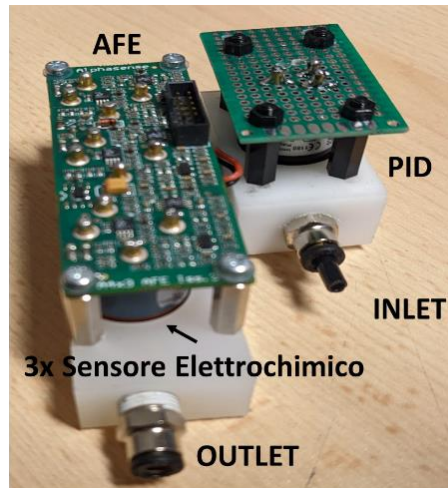


FIG.3. Prototipo della camera di misura per i sensori elettrochimici e per il sensore PID.

Discorso diverso è stato fatto per il sensore di CO₂ che lavora direttamente in aria senza il bisogno di camera di flusso poiché essendo ad assorbimento di massa (sensore di tipo NDIR) ha una sua propria camera con un inlet in membrana semipermeabile altamente idrofobica (figura 4). Questo permette alla CO₂ di permeare con flussi controllati (seguendo la legge di diffusione di massa) e allo stesso tempo alle molecole di acqua (umidità presente nell'ambiente di misura) di essere bloccate o di permeare con concentrazioni molto ridotte o tempi molto lunghi. Ciò risulta importante dato che la molecola di acqua ha picchi di assorbimento nell'infrarosso e può essere considerato uno dei maggiori interferenti per questo tipo di sensori.

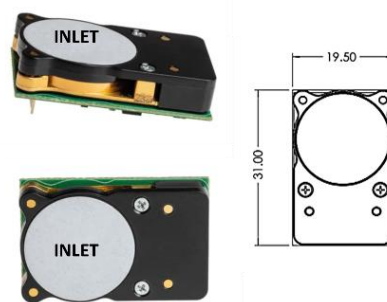


FIG.4. Sensore di CO₂ (by COZIR)

Mediante sensori di tipo NDIR si possono ad oggi eseguire misure su un ampio spettro di lunghezze d'onda comprese tra 3,8 e 10,5 μm (ad esclusione di 5,0 ~ 5,5 μm). Pertanto, la maggior parte dei gas può essere misurata con una sensibilità sufficiente, poiché le intensità di linea della maggior parte dei gas in questo intervallo di lunghezze d'onda sono sempre migliori di quelle nel NIR. Ad esempio, gli spettri di assorbimento di CO_2 , CO , SO_2 , Novec-4710 e SF_6 sono riportati in figura 5 [Gordon, I.E.; Rothman, L.S.; Hill, C.; Kochanov, R.V.; Tan, Y.; Bernath, P.F.; Birk, M.; Boudon, V.; Campargue, A.; Chance, K.V.; et al. The HITRAN2016 molecular spectroscopic database. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2017, 203, 3–69].

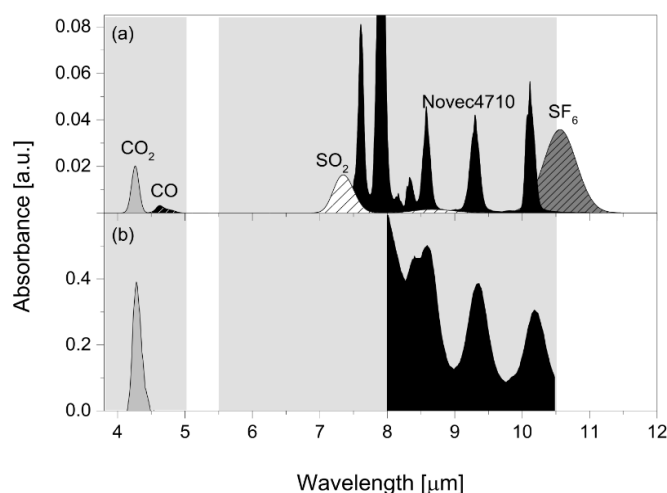


FIG.5. Spettri di assorbimento NDIR per gas target.

Il sensore di CO_2 scelto rispetta le seguenti caratteristiche di tabella 1.

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
CO_2 measurement range			0		2,000	ppm
			0		5,000	ppm
			0		10,000	ppm
Accuracy		@25°C		$\pm(30, +3\%)$ of reading	$\pm(45, +3\%)$ of reading	ppm
		0°C to +50°C, after zeroing @25°C		$\pm(30, +3\%)$		ppm
CO_2 RMS Noise		16 pulses per reading.		-		ppm
Time to Valid Measurement After Power-On		Dependent on number of pulses per reading	0.3	3.3	6.5	secs
Response Time		From 0ppm to T_{90} (half full-scale), default settings, limited by diffusion through membrane window		30		secs
Repeatability				$\pm 30,$ $+3\%$		%
Pressure Dependence		Per mbar deviation from 1013mbar, 950-1050mbar		0.14		%

TAB.1. Tabella di specifica del sensore CO_2 utilizzato per il prototipo.

Per la parte PMx abbiamo utilizzato un sensore commerciale SDS011, sensore che offre buone performance ad un costo molto contenuto. Nella figura 6 riportiamo lo schema a blocchi (a) e una foto del sensore integrato nel sistema Grinbox.

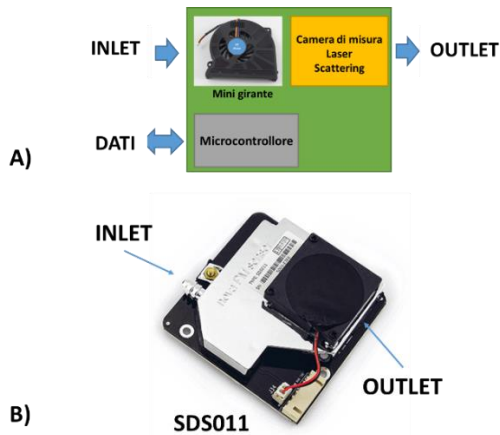


FIG.6. Schema a blocchi e foto del sensore SDS011 per la misura del particolato sospeso.

Nella tabella 2, alcune specifiche del sensore SDS011. Come si evince dalla tabella il sensore restituisce due classi di PM, il PM2.5 e il PM10 calcolati dal processore integrato nel dispositivo stesso. Logicamente il dato in uscita è dato come una concentrazione di massa su un volume ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), risultato di una stima legata alla densità media del particolato misurato (in generale incognito e supposto pari ad 1) e al numero e dimensione delle particelle misurate.

Number	Project	Parameter	Note
1	Measurement parameters	PM2.5, PM10	
2	Range	0.0-999.9 micro-grams / cubic meter	
3	Power supply voltage	5V	
4	Maximum working current	220mA	
5	Sleep current	2mA	
6	Working temperature range	-20-50°C	
7	Corresponding time	1 sec	
8	Serial data output frequency	1 times / sec	
9	Particle diameter resolution	< 0.3 micron	
10	Error	5%	

TAB.1. Tabella di specifica del sensore CO2 utilizzato per il prototipo.

Il bus di interfaccia è di tipo seriale RX/TX (o USB mediante convertitore). Il consumo è non trascurabile, se confrontato con gli altri sensori integrati nel prototipo, poiché il dispositivo ha una piccola ventola che permette il campionamento al flusso che meglio si adatta alla camera di misura (o camera di scattering). Oltre alla ventola abbiamo comunque il consumo, anche questo non trascurabile, del laser. Il sensore satura per valori di PMx maggiori 1 mg/m³.

Nella figura 7 riportiamo uno schema a blocchi che rappresenta il sistema diviso in moduli e sistemati in un contenitore appositamente fabbricato mediante stampa 3D per accomodare i diversi moduli (modulo PMX, Modulo sensori di gas, modulo CO₂, modulo RH/T, modulo radio On/Off filtro e modulo Main Electronic Unit) e la loro cablatura.

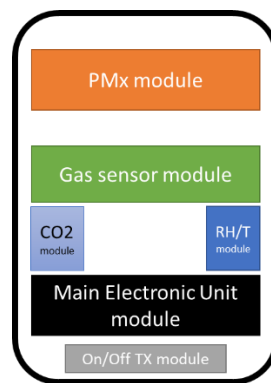


FIG.7. Schema a blocchi sistemazione moduli nel prototipo Grinbox.

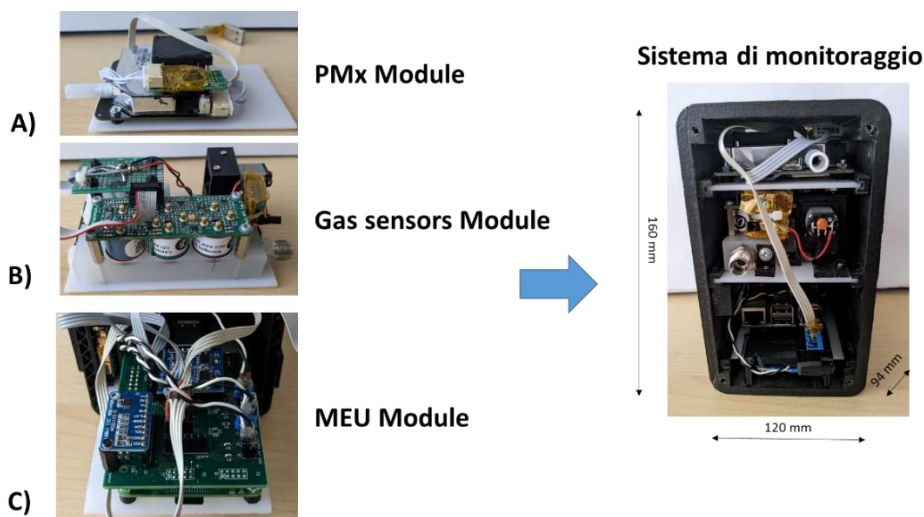


FIG.8. Foto dei principali moduli realizzati e inseriti nel contenitore.



FIG.9. Foto dei principali moduli realizzati e inseriti nel contenitore.

Il sistema di monitoraggio sviluppato (figura 9) possiede due led per identificare: lo stato del sistema (led verde) acceso al momento che lo strumento inizia la fase di misura, il led rosso che si accende al superamento della soglia (fissata a 1000 ppm) di concentrazione di CO₂. Questo secondo led funziona da allarme dato che la CO₂ non riesce ad essere abbattuta dal sistema di abbattimento (in generale difficilmente può essere abbattuta se non con alti costi e sistemi ingombranti). Questo allarme è facilmente trasformabile in un comando “domotica” per esempio che funzioni da attivazione di un ricambio forzato o non di aria. Come già evidenziato in fase di progettazione al superamento di una certa concentrazione di VOC o PM_x il sistema attiverà un comando “domotica” radio di accensione del sistema di abbattimento. I dati della misura saranno sempre accessibili se il sistema si trova connesso WIFI e nel caso contrario saranno sempre salvati nell’unità di massa USB indicata in figura 9. Il SW di controllo e gestione del sistema di monitoraggio è scritto in Python ed è eseguito dalla MEU che si basa su una single board Raspberry Pi.

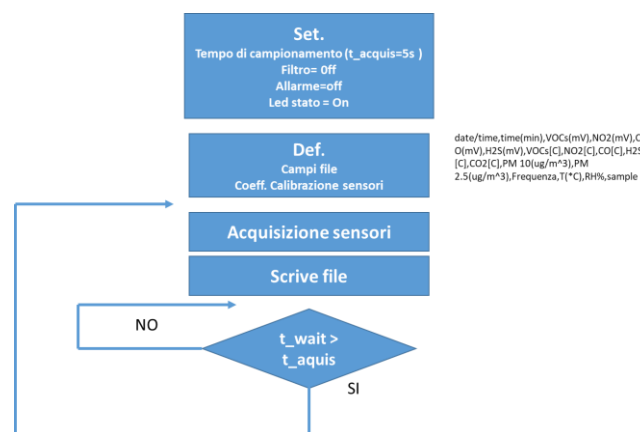


FIG.10. Flow chart semplificato SW di gestione sistema di monitoraggio.

Riportiamo di seguito alcuni script Python che sono parte del SW di gestione. In figura 11 abbiamo la classica parte iniziale di importazione delle librerie che permettono al SW di dialogare con HW integrato. Difatti le librerie più importanti sono le librerie per gli ADC (by Texas) e per il sensore di PMx e CO2.

```
from sds011 import *
#from __future__ import print_function
#from serial import Serial, EIGHTBITS, STOPBITS_ONE, PARITY_NONE
from smbus import SMBus
import board
import busio
import adafruit_am2320
import csv
import time
import re
from datetime import date
import serial, struct
#import Adafruit_ADS1x15
import RPi.GPIO as GPIO
import sys
import adafruit_ads1x15.ads1115 as ADS
from adafruit_ads1x15.analog_in import AnalogIn

GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setwarnings(False)
#GPIO.setup(27,GPIO.OUT) #controllo pompetta
GPIO.setup(12,GPIO.OUT)#uscita allarme co2
GPIO.setup(17,GPIO.OUT)#led acquisizione
GPIO.setup(23,GPIO.OUT)#PIN USCITA AZIONAMENTO FILTRO
GPIO.setup(18,GPIO.IN)#pulsante
GPIO.output(12,0)
GPIO.output(23,0) #PIN USCITA AZIONAMENTO FILTRO
GPIO.output(17,0)#gpio 24
#GPIO.output(27,0)
i2c=busio.I2C(board.SCL, board.SDA)
#adc = Adafruit_ADS1x15.ADS1115()
#adc = Adafruit_ADS1x15.ADS1115(address=0x48, busnum=1)
ads=ADS.ADS1115(i2c,address=72)
#ads1=ADS.ADS1115(i2c,address=72)
ads.gain = 1
#ads1.gain=1
#chan=AnalogIn(ads, ADS.P0)
#chanbus2=AnalogIn(ads1, ADS.P0)
sensor=SDS011("/dev/ttyUSB0")
sensor.sleep(sleep=False)
addr=69 #indirizzo arduino per i2c frequenza
bus = SMBus(1)
#port=serial.Serial("/dev/ttyS0",9600)
#port.open()
#port.flushInput()
am=adafruit_am2320.AM2320(i2c)
```

librerie :

- Gestione dei sensori
- Gestione ADC 16bit
- RTC

FIG.11. Script del software inerente la parte di librerie utilizzate.

Oltre alla parte sensori una delle librerie importanti è quella per la gestione del Real Time Clock (RTC). Alla parte di importazione librerie segue la parte di acquisizione dei sensori per composti VOC, NO2, CO, H2S, CO2 e PMx. Lo script in figura 12, 13 riporta le operazioni di lettura dai vari sensori, tali operazioni saranno ripetute ogni 5 secondi identificato come tempo di acquisizione.

```
if (stato1==0):
    GPIO.output(17,1)#led accensione
    #GPIO.output(27,1)#azionamento pompetta

    l.append(0)
    start=time.time()
    GPIO.output(23,0)

    chan_0=AnalogIn(ads, ADS.P0)
    chan_1=AnalogIn(ads, ADS.P1)
    chan_2=AnalogIn(ads, ADS.P2)
    chan_3=AnalogIn(ads, ADS.P3)
    ...
    chan_4=AnalogIn(ads1, ADS.P0)
    chan_5=AnalogIn(ads1, ADS.P1)
    chan_6=AnalogIn(ads1, ADS.P2)
    chan_7=AnalogIn(ads1, ADS.P3)
    ...

    volts0=chan_0.voltage*1000 #0.125
    volts1=chan_1.voltage*1000
    volts2=chan_2.voltage*1000
    volts3=chan_3.voltage*1000
    ...
    volts4=chan_4.voltage*1000
    volts5=chan_5.voltage*1000
    volts6=chan_6.voltage*1000
    volts7=chan_7.voltage*1000
```

Acquisizione VOC,
Elettrochimici

FIG.12. Script del software inerente la parte di acquisizione sensori VOC, Elettrochimici.

```
try:
    pmt_2_5,pmt_10=sensor.query()
    t=am.temperature -4.5
except:
    t='Nan'
    continue
rh=am.relative_humidity
t1=time1*0.083
```

Acquisizione PMx,
R e T

FIG.13. Script del software inerente la parte di acquisizione sensore di PMx, RH e T.

La parte di “domotica” è generata dallo script riportato in figura 14, che tratta delle regole (per esempio abbiamo riportato semplici regole a soglia) che utilizza il sistema di monitoraggio per decidere di azionare o meno il sistema di abbattimento e per quanto tempo tenerlo attivo. Oltre al filtro le regole sono utilizzate per accendere o spegnere il segnale di allarme superamento livello di CO2. Le regole di figura 14 per semplicità sono a soglia. Ciò al superamento di un valore scatta la decisione. Per aumentare le funzionalità del sistema e per adattarsi ai diversi ambienti dove potrebbe essere posto queste regole potrebbero essere a soglia con feedback della tendenza (derivata prima dei valori controllati). Questo modo di operare può influire sulla durata e sull’efficienza di abbattimento anche in maniera non trascurabile.

```
if pmt_10>=20 and filter_on==False:#controllo polveri

    GPIO.output(23,1) #accende filtro
    y=1
    print (y)
    time.sleep(1)
    GPIO.output(23,0)
    filter_on=True
if filter_on==True and pmt_10<20 :
    GPIO.output(23,0)
    time.sleep(1)
    GPIO.output(23,1)
    filter_on=False

if co2ppm>=850 and allarm_on==False: #controllo co2
    GPIO.output(12,1) #accende led allarme
    allarm_on=True
if allarm_on==True and co2ppm<850:
    GPIO.output(12,0)
    allarm_on=False
```

- Regole di decisione on/off filtro
- Regole di decisione di allarme CO2

FIG.14. Script del software inerente la parte di regole di decisione per attivare il sistema di abbattimento e on/off allarme CO2. Lo script riporta dei livelli indicativi (utilizzati durante prove di laboratorio) che possono essere cambiati seguendo dei criteri di qualità dell'aria regolamentati.

Nella parte finale del SW alte azioni sono eseguite per scrivere i dati sul file. Questi dati sono accessibili da rete in ogni momento. Il file è aperto e chiuso ad ogni ciclo di acquisizione e la scrittura funziona come un'azione di "append" sullo stesso, risultando aggiornato qualora si dovesse accedere da remoto per diagrammare o elaborare i dati.

WP2

Progettazione e sviluppo sistema di abbattimento

Il sistema di abbattimento sviluppato è costituito da un filtro a carboni attivi, un filtro HEPA, un tubo do flusso connesso ad un aspiratore di media portata. Il processo di abbattimento tramite filtrazione HEPA (High-Efficiency Particulate Air) indica uno standard di efficienza nel filtraggio dell'aria. I filtri classificati HEPA sono in grado di bloccare quasi il 100% delle particelle di dimensioni fino a 0,3 micron. In Europa i filtri per l'abbattimento del particolato, come quelli HEPA, sono suddivisi in tre gruppi.

I tre gruppi sono indicati dalla prima lettera:

- E – EPA | Efficient Particulate Air filter
- H – HEPA | High Efficiency Particulate Air filter
- U – ULPA | Ultra Low Penetration Air filter

I tre gruppi sono poi suddivisi in differenti classi : E10, E11, E12, H13, H14, U15, U16. La classe di filtro più comune nei purificatori d'aria per ambienti indoor di tipo domestico è la H13, che secondo lo standard europeo dovrebbe arrivare a rimuovere almeno il 99,95% delle particelle fino a 0,3 micron. Generalmente i filtri HEPA sono costituiti da pannelli ripiegati di microfibra di vetro (per esempio borosilicato) non-woven (disordinate). Queste fibre hanno generalmente un diametro che va dai 0,5 ai 2 micron con spazi tra fibra e fibra che può essere di gran lunga maggiore ai 0,3 micron delle particelle più piccole che riescono a bloccare.

Quattro sono i meccanismi principali alla base della funzione di blocco del particolato di diverse dimensioni nei filtri HEPA: effetto setaccio (o diffusione), intercezione, impatto, attrazione elettrostatica come riportato in figura 5.

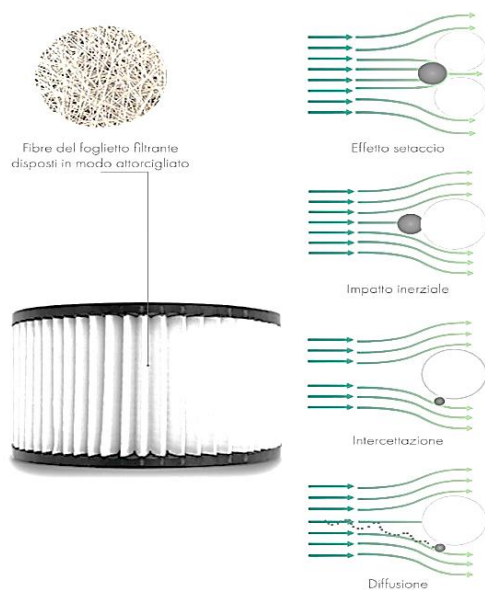


FIG.15. Meccanismi di blocco del particolato nei filtri di tipo HEPA.



L'effetto a setaccio è il fenomeno fisico utilizzato per bloccare le particelle più fini, specialmente al di sotto dei 0,1 micron, che vengono rallentate e ostacolate dalle altre molecole di gas, e quindi finiscono per aderire alle fibre del filtro. La diffusione ha il maggiore effetto con un flusso d'aria lento, ed è per questo che il fumo viene di solito filtrato meglio con una velocità di aspirazione più bassa. L'intercezione e l'impatto inerziale sono i due meccanismi sfruttati dai filtri HEPA per bloccare le particelle di maggiori dimensioni (sopra gli 0,4 micron). L'impatto inerziale, in particolare, viene favorito da un flusso d'aria più elevato. L'ultimo, l'attrazione elettrostatica viene di rado implementata perché meno efficiente ed energivora. I filtri HEPA non sono in grado di filtrare i gas, gli odori e i composti organici volatili (VOC). Per questo vengono quasi sempre abbinati ad un filtro a carboni attivi o equivalente. I processi che governano il funzionamento di questa tipologia di filtri e il processo di adsorbimento.

In particolare nel processo di *adsorbimento* le molecole gassose diffondono attraverso la superficie solida ed aderiscono a quest'ultima tramite meccanismi complessi che possono essere attivati da forze fisiche o da particolari reazioni chimiche (chemio-adsorbimento) oppure da una combinazione delle due. La capacità di catturare le molecole gassose da parte della matrice solida deriva dalla particolare caratteristica di determinati materiali di possedere una grandissima microporosità come.

Il processo di adsorbimento può essere riassunto nei seguenti punti:

- le molecole gassose presenti nel flusso in ingresso al filtro di rimozione diffondono attraverso la superficie solida del materiale adsorbente, questo meccanismo inizialmente casuale poiché le molecole tendono a diffondere in entrambe le direzioni (dal flusso gassoso alla matrice solida e viceversa), si stabilizza grazie alla differenza di concentrazione (gradiente di concentrazione) tra il flusso contaminato e la matrice solida, per cui la sua efficienza tende a decrescere nel tempo poiché la differenza di concentrazione diminuisce man mano che la matrice solida adsorbe le sostanze contaminanti. L'efficienza di rimozione è inoltre bassa per flussi di gas in ingresso con basse concentrazioni di inquinanti;
- le molecole gassose diffuse nella matrice solida penetrano all'interno dei pori e si depositano sulla loro superficie esposta, la distanza di diffusione è tanto più bassa e l'efficienza del processo di adesione è tanto più alta tanto più le particelle di materiale adsorbente sono di piccole dimensioni. La matrice solida è difatti sempre presente in forma di materiale granulare o fibroso, impacchettata o pellettizzata in modo da fornire un'area superficiale maggiore;

- le molecole gassose penetrate all'interno dei pori si legano alla superficie di questi ultimi, condensando cioè rilasciando energia.

Nella tabella 2 sono riportati solo alcuni dei materiali utilizzati per l'abbattimento dei composti gassosi.

Materiali adsorbenti	Vapori o gas catturati
Carbone attivo	Vapori organici, ozono, gas acidi (H ₂ S)
Alluminia attivata	Composti organici polari come: alcoli, fenoli, ammine alifatiche e aromatiche
Silica gel	Acqua, e composti organici polari
Setacci molecolari (ad esempio: zeoliti)	CO ₂ , composti a base di iodio
TAB.2. Materiali utilizzati per l'abbattimento di composti gassosi.	

Il carbone attivo utilizzato diffusamente come principale materiale adsorbente è prevalentemente di origine vegetale, opportunamente lavorato e trattato assume forme di granuli, scaglie o cilindretti, questi ultimi aventi dimensioni di qualche millimetro. I filtri/adsorbitori a carboni attivi vengono impiegati nel settore industriale su impianti di processo e di risanamento dell'ambiente di lavoro per la tutela della qualità dell'aria, per esempio, nei settori:

- rimozione/recupero solventi o miscele di solventi;
- depurazione dell'aria da processi produttivi;
- disoleazione di aria compressa;

- deodorazione di aria esausta e gas di sfianto;
- rimozione di sostanze nocive negli impianti di condizionamento.

Il carbone è contenuto in pannelli, tasche, cartucce o semplicemente inserito in contenitori di calcolate dimensioni formanti il letto di attraversamento (*adsorber bed*) del fluido gassoso contenente l'inquinante da adsorbire. Le capacità adsorbenti del carbone attivo sono particolarmente indicate per l'abbattimento di composti organici con peso molecolare compreso tra 50 e 200; composti organici con peso molecolare minore non vengono adsorbiti sufficientemente a causa delle piccole dimensioni. La capacità di adsorbimento viene espressa in peso percentuale ovvero in kg di contaminante organico adsorbito per 100 kg di carbone attivo impiegato. Tale capacità è compresa tra valori minimi di 1% fino a valori massimi del 30%. L'efficienza dei filtri a carbone attivo è condizionata da una serie di parametri quali il peso molecolare e la concentrazione degli inquinanti, la temperatura, l'umidità, la pressione e la presenza di particolato nel flusso da trattare. La presenza di particolato, andando a ridurre le microporosità del carbone, ne riduce l'efficienza di adsorbimento pertanto esso va catturato a monte con opportuni pre-filtri. Il sistema di abbattimento sviluppato si basa su di un purificatore di aria, appositamente modificato per ottimizzarne il funzionamento nel sistema GrinBox. Nella tabella 3 sono riportati i tipi di filtro che compongono il prototipo sviluppato e che sarà testato nelle successive fasi del progetto.

Tipologia dei filtri	Superficie trattata, in m ²	CADR, m ³ /h
- filtro HEPA H13	17	200
- filtro ai carboni attivi		
- pre-filtro in nylon		

TAB.3. Tipologia di filtri che costituiscono il sistema di abbattimento sviluppato. Il CADR (Clean Air Delivery Rate) è un valore che indica sostanzialmente il volume di aria priva di particelle inquinanti emessa da un purificatore in un determinato lasso di tempo.

Uno schema del filtro del sistema di abbattimento è riportato in figura 16.

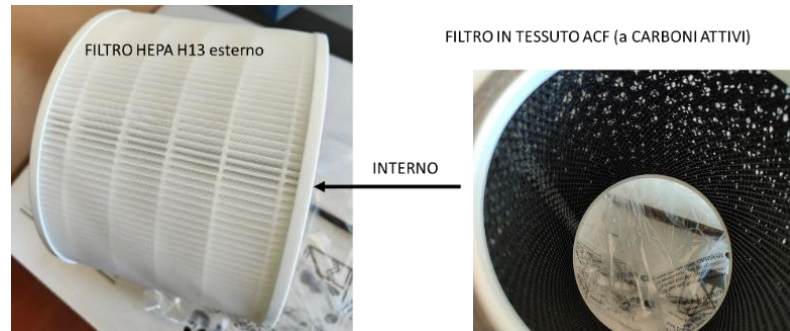


FIG.16. Schema costruttivo del filtro del sistema di abbattimento.

Nella figura 17 riportiamo il prototipo del sistema di abbattimento che è composto da: una scheda elettronica per la gestione dell'aspirazione (attivazione del filtro) da remoto (controllato dal sistema di monitoraggio sviluppato), un aspiratore di tipo rotativo a pale e il filtro composto come precedentemente descritto.

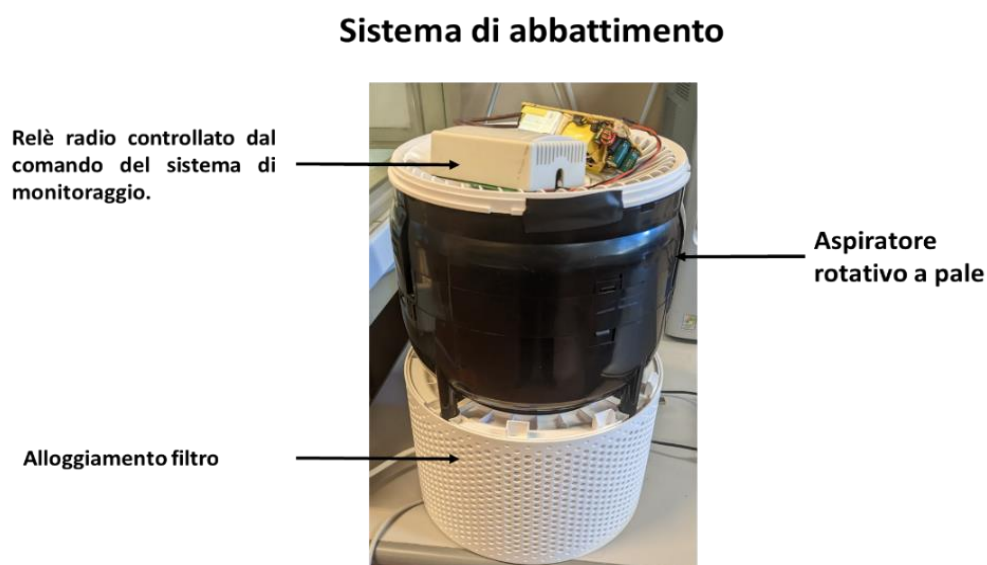


FIG.17. Sistema di abbattimento inquinanti radio controllato dal sistema di monitoraggio.

Nella figura 18 riportiamo il sistema GrinBox sviluppato e costituito dai due prototipi del sistema di monitoraggio e del sistema di abbattimento.

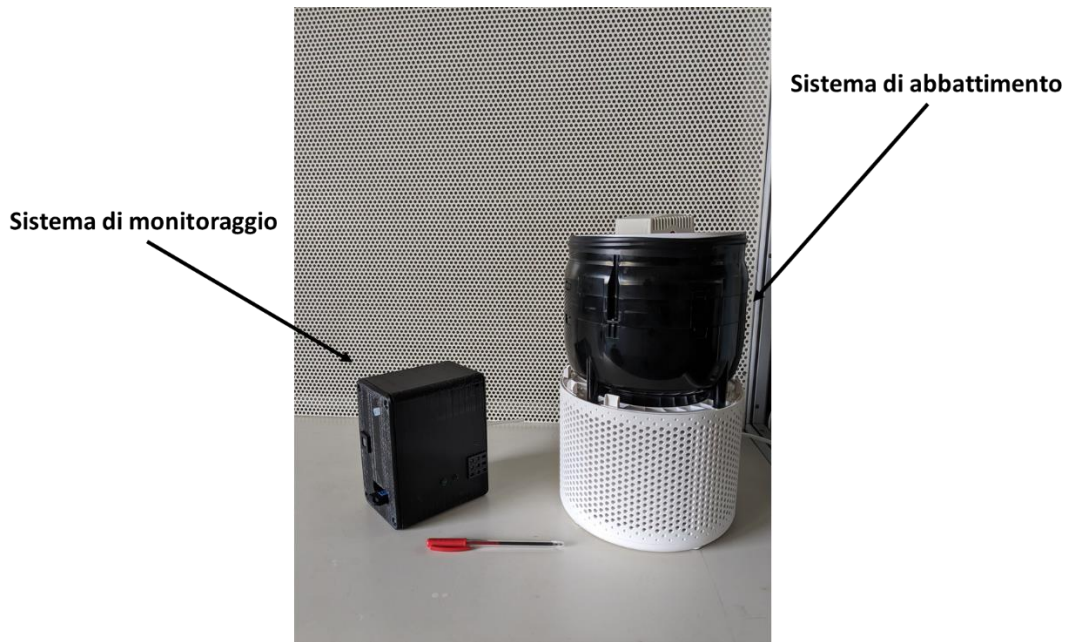
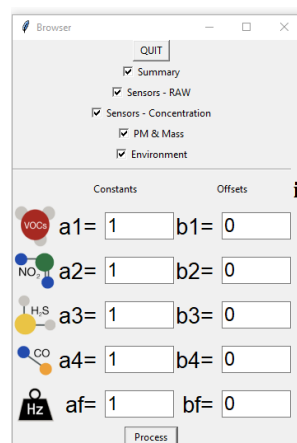


FIG.18. Prototipo sistema GrinBox.

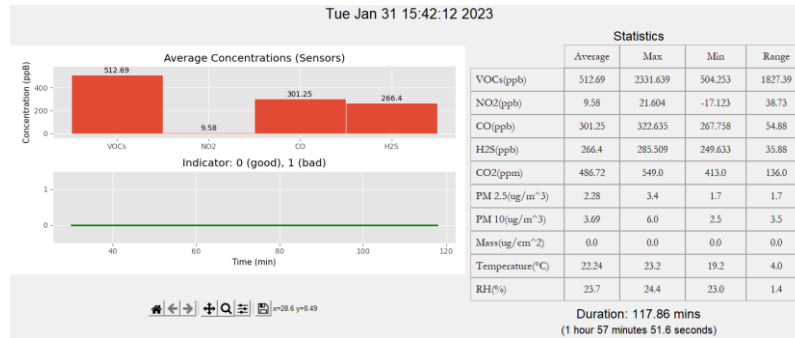
WP3

Progettazione dell'interfaccia con controllo per domotica.

Le principali attività hanno riguardato lo sviluppo in ambiente Python dell'interfaccia di visualizzazione domotica dei dati provenienti dal sistema di monitoraggio Grinbox. L'interfaccia si basa su una prima scheda di selezione come quella riportata di seguito dove è possibile selezionare i dati di interesse.



I dati vengono riportati in differenti schede che descrivono con plot temporali le risposte dei sensori installati (TVOC, NO₂, CO, H₂S, CO₂) nonché i dati di PM_x e una scheda finale di riassunto statistico. Nella scheda in questione è riportato anche un cronogramma temporale delle volte che il sistema accende il sistema di abbattimento (punti di ON/OFF). Il sistema di abbattimento è acceso al soddisfarsi della regola di accensione (superamento soglie) come sotto riportato.



Il software (SW) di gestione del sistema di monitoraggio è stato sviluppato in Python e consente di poter leggere e plottare i dati registrati in locale dal sistema, attraverso rete (se connesso) o direttamente scaricando il file della misura dalla memoria di massa collegata. Il SW consiste in un menu' principale di scelta (figura 19) che si apre una volta caricato il file dei dati.

Software di lettura dati: Menu principale

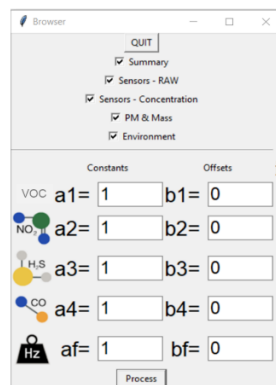


FIG. 19. Menu di scelta principale.

Nel menu principale è possibile scegliere di generare delle schede informative come: Summary (riassunto dei dati), plot temporale dei dati RAW, plot temporale delle concentrazione, plot delle concentrazione di PM_x e dati ambientali come temperatura e umidità relativa. Un file di esempio, del maggio 2022 con durata di circa

22 ore, è di seguito riportato. Sia i dati in concentrazione come il dato di massa non essendo ancora corretto da calibrazione è da intendere come dato grezzo non corretto (figure da 20 a 22). A valle della fase di calibrazione saranno annotati dei coefficienti ($a_1, a_2, a_3, a_4, a_f, b_1, b_2, b_3, b_4, b_f$), il programma li userà per estrarre dai dati RAW le concentrazioni per ogni sensore tranne il sensore di CO₂ che ha un suo procedimento digitale di taratura e correzione.

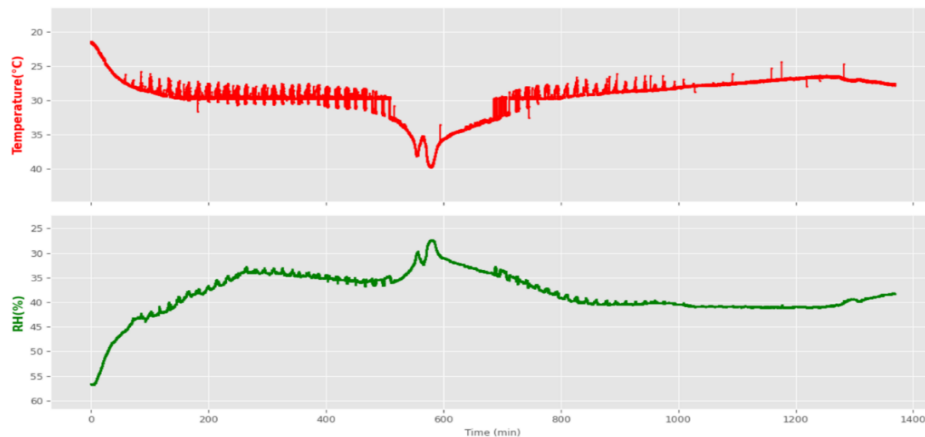


FIG. 20. Scheda dei parametri ambientali di temperatura e umidità relativa.

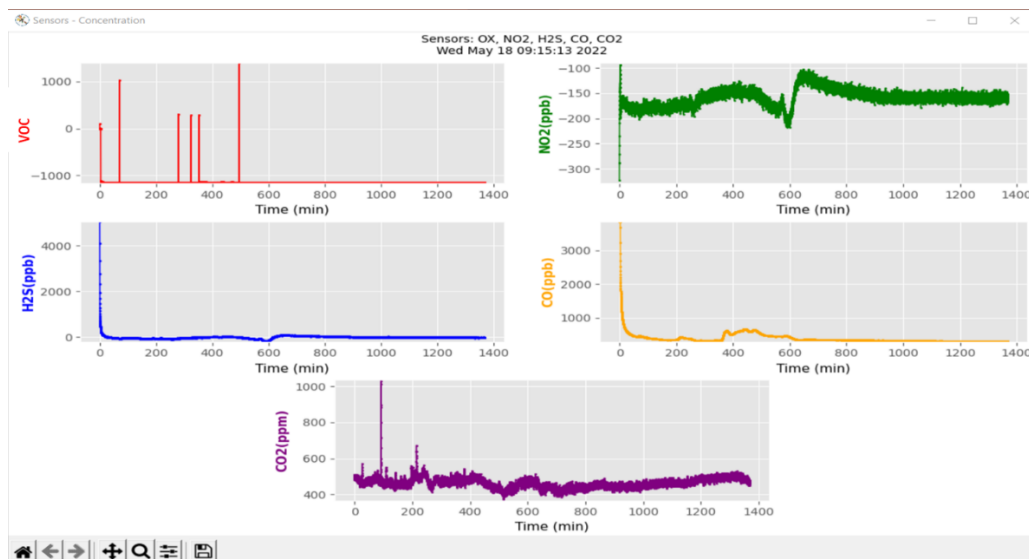


FIG. 21. Scheda delle concentrazioni dei sensori di H₂S, CO, NO₂, VOC, e CO₂ (dati da correggere a valle della calibrazione e taratura).

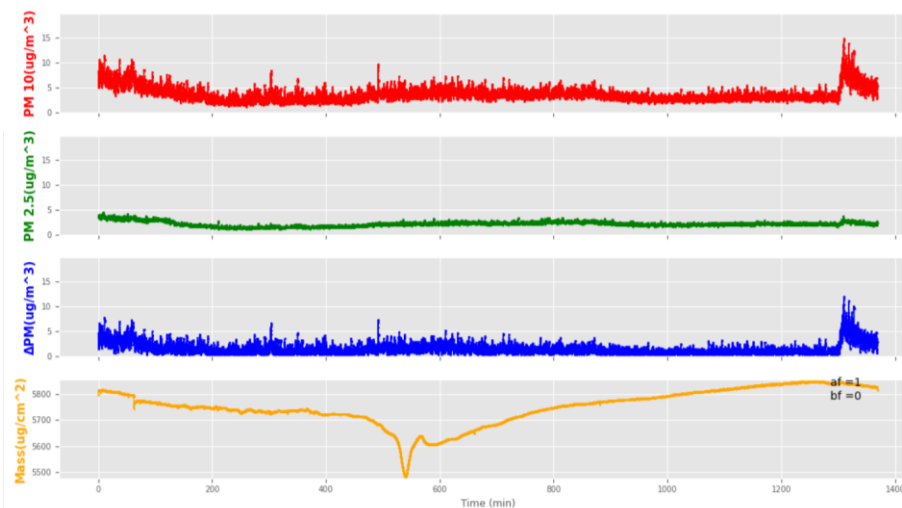


FIG. 22. Scheda delle concentrazioni di PM2.5 e PM10; anche in questo caso i dati sono senza correzione e quindi affetti da errore. Nel grafico riportiamo il dato sperimentale della massa totale misurata mediante sensore di massa sperimentale.

La scheda di “Summary” e una scheda di tipo riepilogativo della misura, dove abbiamo:

- “Average Concentrations (of Sensors)” mostra le informazioni circa i valori medi delle concentrazioni misurate durante tutto il periodo della misura con un grafico ad istogrammi.
- “Indicator”, plot del comando di intervento per il filtro di abbattimento inquinanti. Il comando seguirà la regola stabilita e parametrizzata a valle del processo di calibrazione e taratura.
- “Statistics” tabella riportante alcune statistiche elementari sui dati di misura.

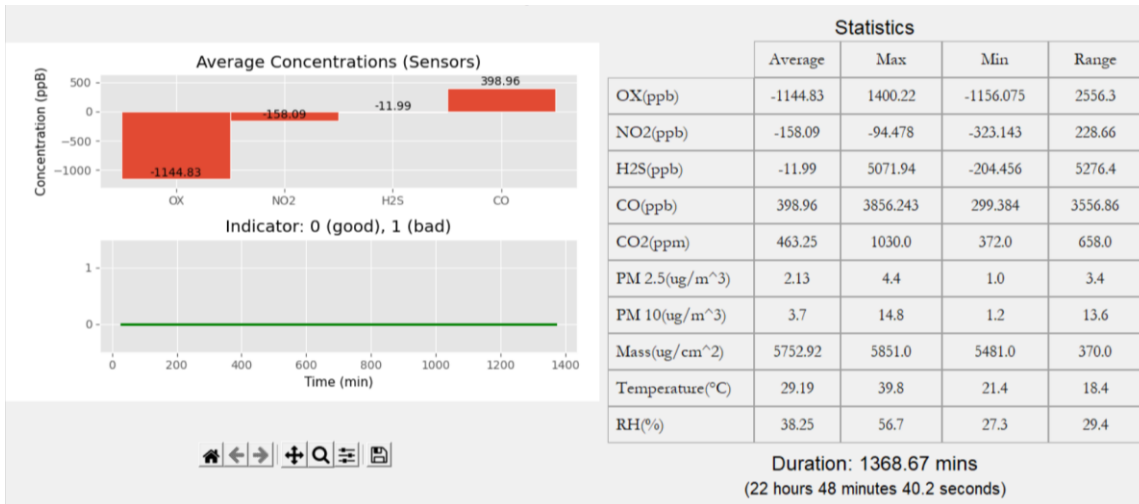


FIG. 23. Scheda di "Summary".

WP4

Valutazione del ciclo di vita del sistema progettato (LCA-Life Cycle Assessment)

Nell'allegato A1 " *L'impatto ambientale del sistema di misura GRINBOX. Analisi sull'intero ciclo di vita (LCA)* " è riportato il report LCA per il sistema progettato. L'analisi ha permesso di stimare gli impatti ambientali della produzione, smaltimento e utilizzo del sistema GRINBOX. In generale, gli impatti possono considerarsi piuttosto bassi, anche in virtù delle dimensioni estremamente contenute dei componenti, e conseguentemente dei materiali impiegati per la loro produzione. I consumi energetici derivanti dall'uso del sistema si sono dimostrati uno dei fattori più importanti per quanto riguarda gli effetti sui cambiamenti climatici in virtù del mix energetico preso in considerazione, che contiene ancora una cospicua componente termoelettrica con combustibili fossili. Un altro fattore importante per tutti i parametri considerati è stata la durata più ridotta dei sensori elettrochimici, pari a 2 anni contro i 5-15 anni degli altri componenti, che quindi ha più che raddoppiato l'impatto del singolo sensore, per simulare la necessità di una sostituzione. Per sviluppi futuri si può ipotizzare la sostituzione del Raspberry Pi 4 come unità logica con un sistema più semplice e con consumi inferiori, quale ad esempio Arduino. Similmente, la scelta di sensori elettrochimici più costosi, ma al contempo più robusti, può comportare impatti maggiori per la produzione e smaltimento del singolo oggetto, ma potrebbe evitare la sostituzione dei sensori durante l'uso e conseguentemente ridurre gli impatti ambientali complessivi.

WP5

Definizione di una procedura di certificazione

Nell'allegato A2 "*Linee guida per una procedura di monitoraggio e controllo della qualità dell'aria negli ambienti indoor*" sono presenti linee guida che hanno lo scopo di definire, a partire dall'analisi della letteratura scientifica e delle attuali norme tecniche disponibili, una procedura di monitoraggio e controllo della qualità dell'aria degli ambienti indoor. Nel documento è inoltre riportato un focus specifico sull'utilizzo del sistema di monitoraggio realizzato nell'ambito del progetto GRIN-BOX.

WP6

Testing e validazione dei sistemi di monitoraggio

Introduzione

Le attività di test e validazione sono state condotte attraverso differenti metodologie a seconda del tipo di sensore che era oggetto delle attività. Riassumendo per la parte sensori di gas è stato utilizzato il sistema di monitoraggio per valutare diverse concentrazioni simulate da un sistema di miscelazione aria/inquinante (proveniente da bombola certificata). Lo stesso campione è stato inviato ad uno strumento analitico precedentemente calibrato. Per la parte PMx il sistema Grinbox è stato posto in tre differenti ambienti dove la concentrazione di PM_{2.5} e PM₁₀ era contemporaneamente misurata da un analizzatore calibrato (un esempio è riportato in figura). Nei

Analizzatore a chemiluminescenza di NO₂,NO

Grinbox sistema di monitoraggio

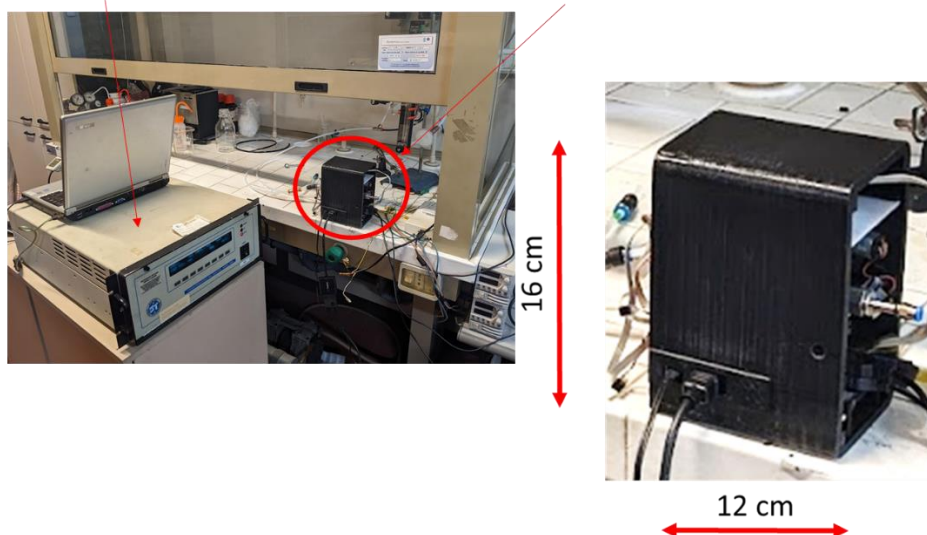


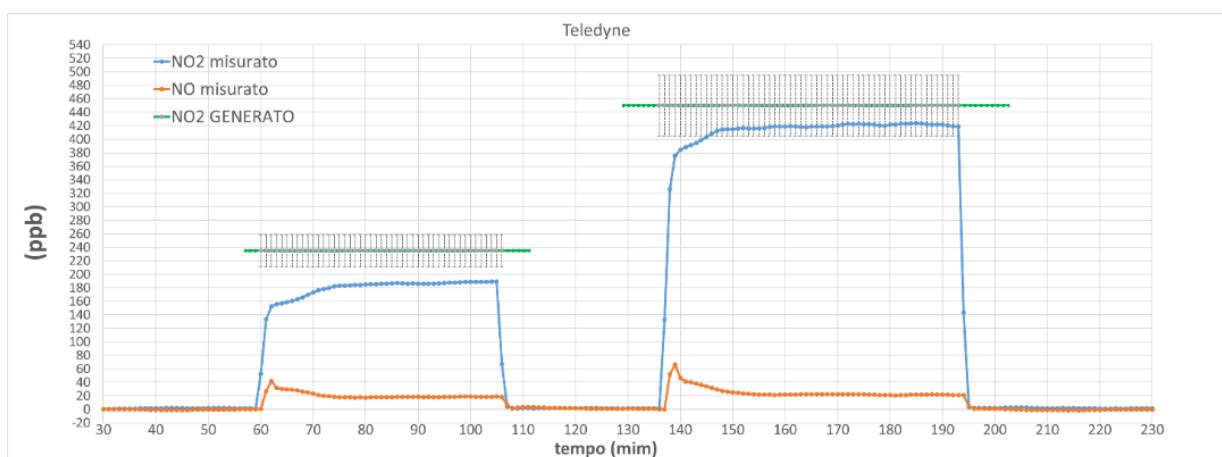
FIG. 24. Set-up di calibrazione in laboratorio

L'analizzatore utilizzato è stato un Teledyne 200e, il quale utilizza il metodo di rilevamento della chemiluminescenza, abbinato alla tecnologia a microprocessore all'avanguardia per fornire la sensibilità, la stabilità per i requisiti di monitoraggio CEM dell'ambiente (Ossidi di azoto: UNI EN 14211:2012: "Qualità dell'aria ambiente. Metodo normalizzato per la misurazione della concentrazione di diossido di azoto e monossido di azoto mediante chemiluminescenza"). Le misurazioni vengono compensate automaticamente per gli intervalli, da 0-50 ppb a 0-20 ppm, selezionabili dall'utente Intervalli indipendenti per variazioni di temperatura e pressione di NO, NO₂, NOX. Il software multi-tasking consente di visualizzare le variabili del

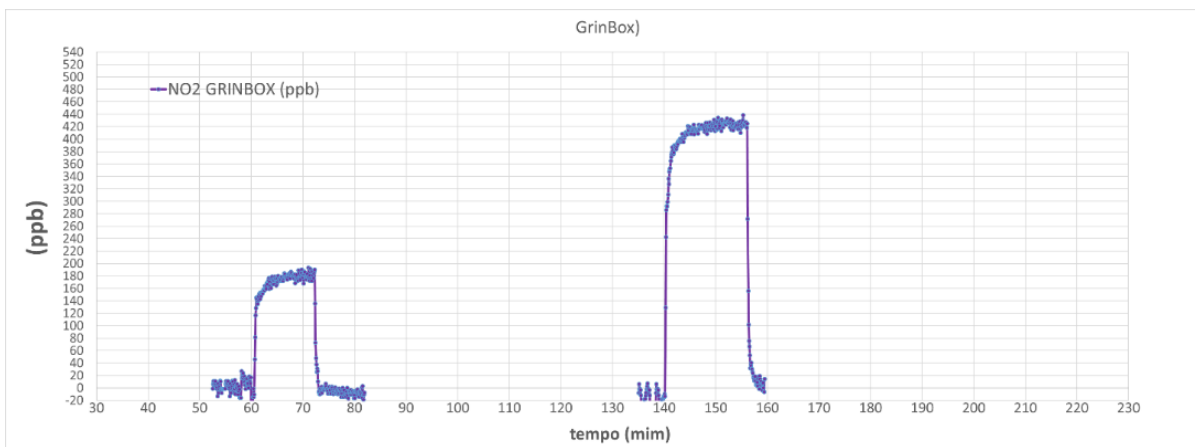
test mentre il risultato operativo è sensibile, accurato e affidabile inoltre il filtraggio adattivo del segnale ottimizza i tempi di risposta.

La chemiluminescenza è basata sulla reazione del NO con l'ozono (ciclo di Chapman) e consiste nell'emissione di luce durante la reazione chimica in fase gas di NO e ozono. La luce è prodotta quando gli elettroni delle molecole di NO₂ eccitato passano a livelli energetici "inferiori" ed ha un'intensità proporzionale alla concentrazione di NO. Generalmente, nell'analizzatore l'aria campionata passa attraverso un filtro (utile a evitare la contaminazione del gas che entra nel sistema e a proteggere le componenti ottiche dell'analizzatore) e viene alimentata con portata costante all'interno della camera di reazione, nella quale l'aria viene miscelata con l'ozono in eccesso per determinare la concentrazione dell'NO. La radiazione emessa è proporzionale al numero di molecole nel volume di controllo, dunque alla concentrazione, e viene filtrata da filtri ottici selettivi e convertita in un segnale elettrico con un fotomoltiplicatore o un fotodiode. Per la determinazione del NO₂, l'aria campionata è alimentata attraverso un "converter" nel quale l'NO₂ è ridotto a NO e poi analizzato nel modo appena definito. Il segnale elettrico ottenuto dal fotomoltiplicatore/fotodiode è proporzionale alla somma delle concentrazioni di NO₂ e di NO, quindi l'NO₂ è calcolato come differenza tra questa concentrazione e quella ottenuta dal solo NO (quando l'aria campionata non è passata attraverso il "converter").

Le misure in laboratorio sono state condotte utilizzando un sistema di diluizione aria/composto da analizzare ,partendo da una concentrazione nota in bombola certificata. In figura 25a abbiamo riportato le concentrazioni misurate dall'analizzatore Teledyne 200e nella camera di miscelazione aria/NO₂. Il plot di figura 25a mostra sia i valori di NO₂ teoricamente generati partendo dal valore certificato della bombola di NO₂.



a)



b)

FIG. 25. Misura di due concentrazioni generate con sistema di mix gas per GrinBox. A) Concentrazioni misurate con l'analizzatore calibrato Teledyne 200e

Come si evince dal grafico i valori misurati rientrano nell'intervallo di incertezza dovuto alla precisione con cui è avvenuta la miscelazione del composto. In figura 25b troviamo invece la risposta del sistema sviluppato. La misura risulta accurata, ciò dovuto alle precedenti attività di calibrazione del sistema. I tempi di risposta sono inferiori ai 10 min alla concentrazione testata. Nel caso del CO abbiamo generato la concentrazione voluta sempre mediante diluizione da bombola certificata e misurato mediante il sistema sviluppato la concentrazione di CO all'uscita della camera di diluizione. In questo caso il sensore di CO non è stato calibrato ma abbiamo utilizzato i parametri certificati di sensibilità e offset forniti dalla ditta produttrice. I risultati, riportati in figura 26 mostrano una buona accuratezza del dispositivo sviluppato.

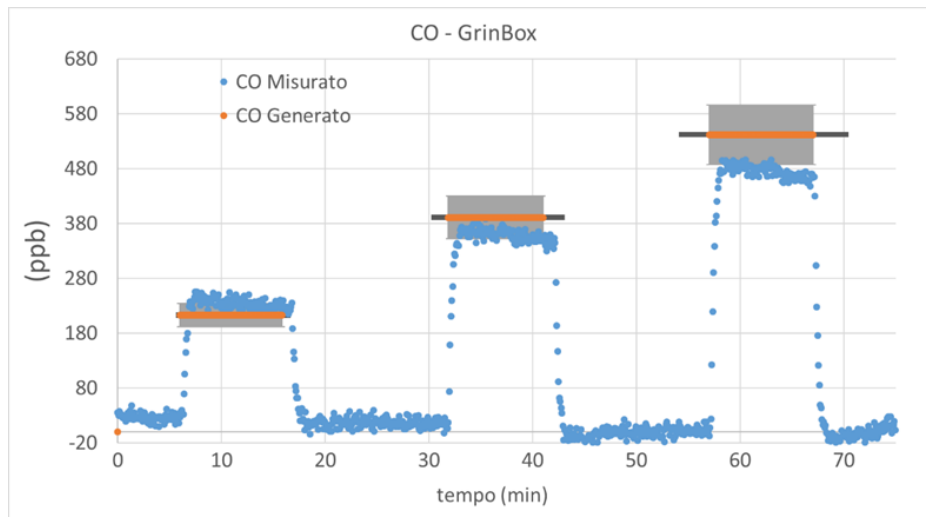


FIG. 26. Risultati della misura di CO del sistema di monitoraggio sviluppato. La concentrazione di CO è stata ottenuta mediante diluizione (in aria) da bombola certificata.

Stessa cosa è stata effettuata per l'H₂S e per la CO₂. I risultati della misura sono riportati nelle figure 27, 28.

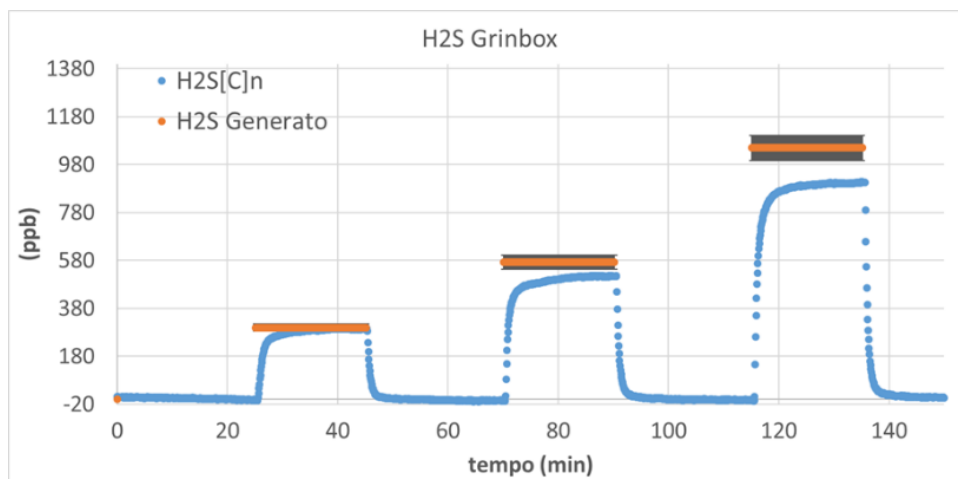


FIG. 27. Risultati della misura di CO del sistema di monitoraggio sviluppato. La concentrazione di CO è stata ottenuta mediante diluizione (in aria) da bombola certificata.

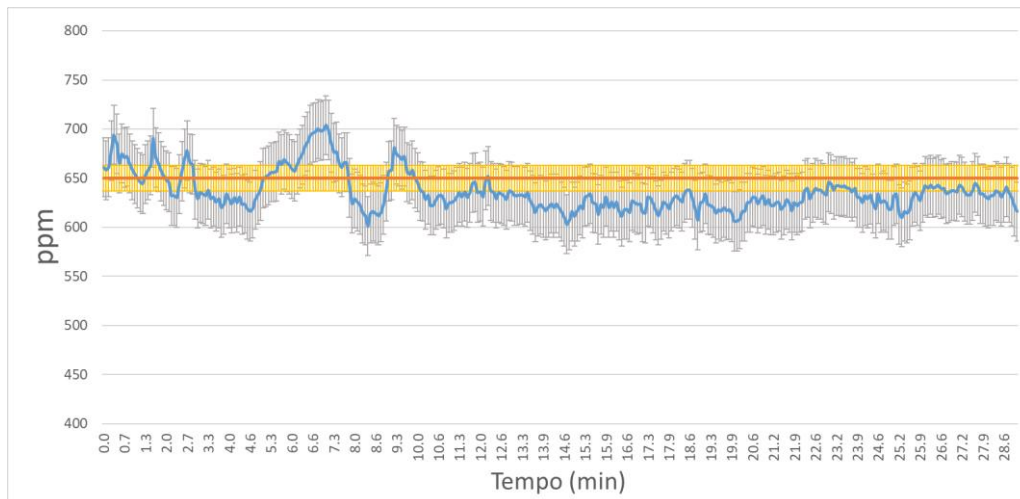


FIG. 28. Risultati della misura di CO₂ del sistema di monitoraggio sviluppato. La concentrazione di CO₂ è stata ottenuta mediante diluizione (in aria) da bombola certificata. L'errore riportato per il sensore di CO₂ del sistema è quello descritto nei fogli tecnici dello stesso (+-30ppm). Nel caso della CO₂ la fluttuazione iniziale potrebbe essere dovuta al tempo di stabilizzazione del composto all'interno della camera di misura, che nel nostro caso si attesterebbe su tempi minori di 10 min. In azoto il sensore misurava valori di 20-30 ppm come da dati di fabbrica.

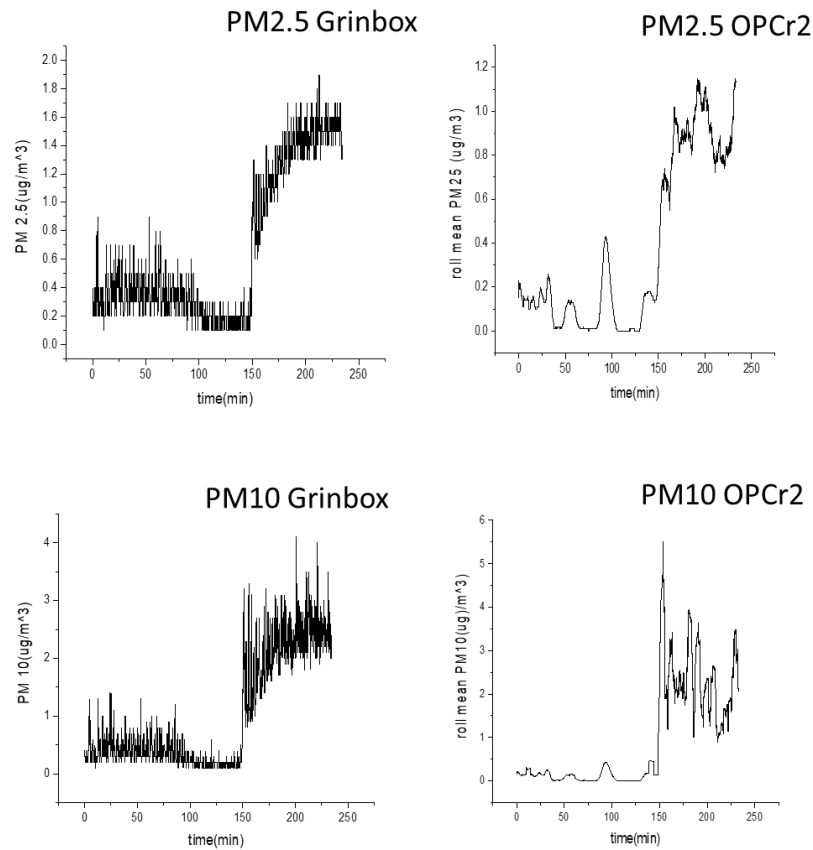


FIG. 29. Confronto tra misura PM in camera depolverizzata mediante filtri EPA eseguita con il sistema sviluppato e con un OPC calibrato (OPCr2).

Per la parte PMx abbiamo condotto diversi esperimenti mettendo a confronto i valori del PM2.5 e del PM10 misurati dal sistema sviluppato e da un OPC calibrato (OPCr2). I dati mostrati sono dati raw per il sensore installato all'interno del sistema sviluppato mentre filtrati per l'OPCr2 (filtro a media mobile).

Come si evince dai risultati ottenuti il sensore a basso costo montato nel sistema segue l'andamento e i valori bassi del particolato presente sovrastimando leggermente il PM2.5. la discrepanza comunque rientra nella accuratezza del sensore utilizzato (che da fogli tecnici è circa $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$). In questo caso (figura 29) le misure si sono effettuate in camera depolverizzata con filtri EPA e con temperatura e umidità controllata. Misura diversa è quella riportata in figura 30 dove abbiamo misurato il PM in un'area outdoor, vicino il nostro laboratorio con basso flusso veicolare ma non assente.

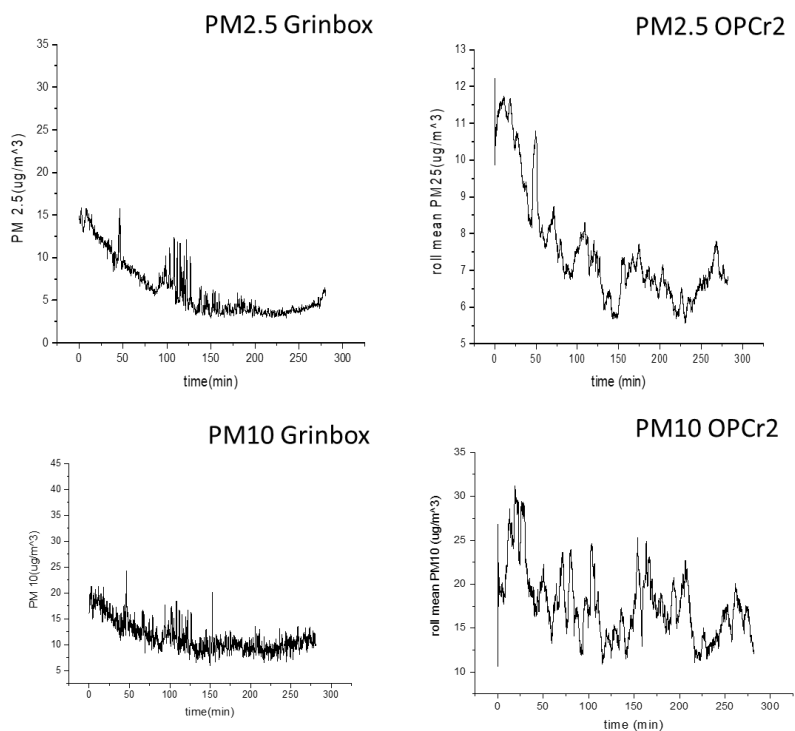


FIG. 30. Confronto tra misura PM in camera depolverizzata mediante filtri EPA eseguita con il sistema sviluppato e con un OPC calibrato (OPCr2).

Il sistema se pur mostrando una deviazione dal valore misurato con l'OPC calibrato risulta generare dati validi. Difatti gli andamenti sono molto correlati come è facilmente visibile al "minuto 50" dove un picco di PM_{2.5} è rilevato sia dal sistema sviluppato che dal sensore calibrato di riferimento.

Risultati delle prove in ambiente reale

Abbiamo condotto l'esperimento in una stanza di circa 30 m³ con la presenza di una sorgente molto elevata di particolato e altri composti generati dal fumo di sigaretta. Nei grafici riportati abbiamo utilizzato per i VOC un indice da 0 a 1000 (dove 1000 si raggiunge alla saturazione del sensore in presenza di 100 ppm di VOCs totali). Abbiamo inoltre riportato la misura della CO₂, molecola non abbattuta da sistema ma importante composto per la valutazione della qualità dell'ambiente indoor preso in esame. Per ultimo abbiamo riportato il principale inquinante generato da un processo di combustione come quello della sigaretta, il PMx nelle due classi misurate dal sistema GrinBox (PM_{2.5}, PM₁₀). In figura 31 mostra la situazione di background (sigaretta spenta, due persone presenti fino all'accensione della sigaretta, finestre chiuse) della stanza dove abbiamo condotto l'esperimento.

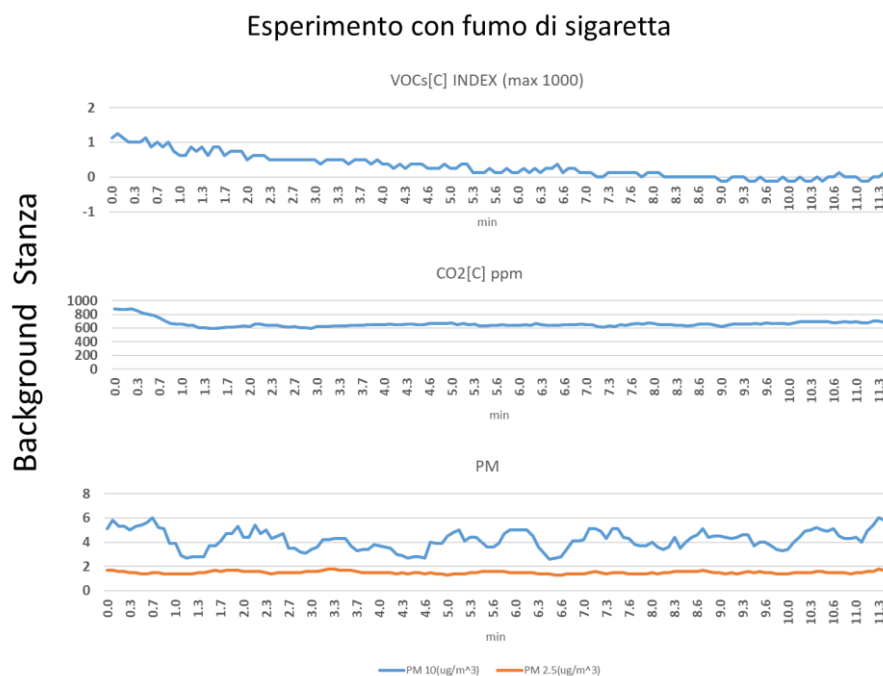


FIG. 31. Risultati della misura all'interno della stanza in condizioni "normali", tale misura è stata assunta come situazione di background per l'esperimento.

Possiamo evidenziare che in figura 31, in particolare nella misura che riguarda i VOCs, abbiamo qualche minuto di assestamento del sensore PID, dovuto al normale tempo di warm-up (circa 5-10 min). Successivamente abbiamo acceso una sigaretta e poi una seconda nella stanza dove era presente il solo fumatore. Nella figura 32 sono riportati i valori dei tre composti misurati durante questa seconda fase

dell'esperimento. In particolare sono state accese e consumate dal fumatore due sigarette (la seconda non completamente). Nella figura 32 i due punti di accensione sono stati indicati con i punti 1e2. Ben evidente è il trend di crescita dei VOCs, della CO₂ e delle PMx.

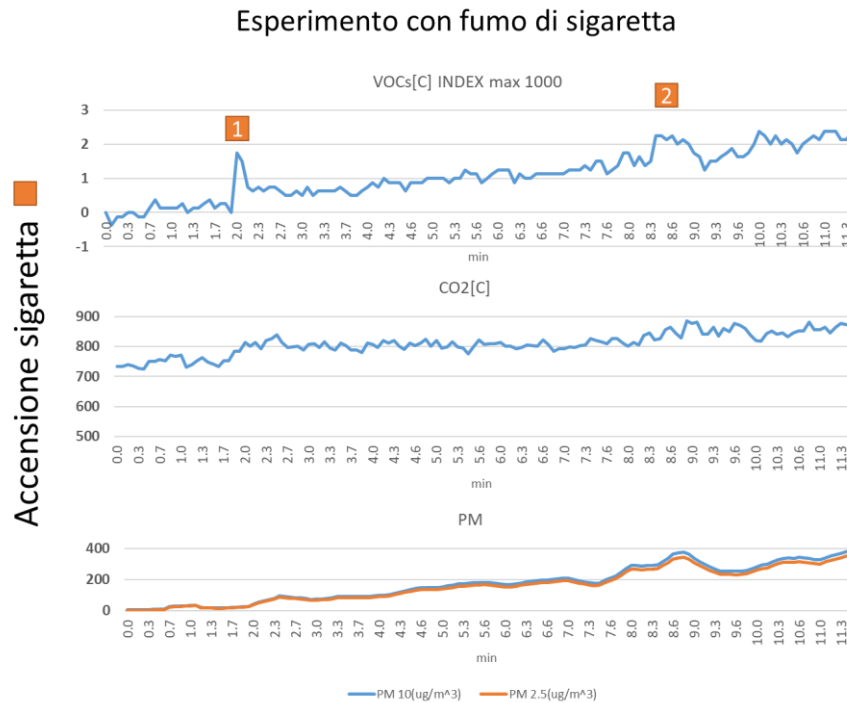


FIG. 32. Risultati della misura all'interno della stanza con accensione di sigaretta classica.

Nella terza ed ultima fase dell'esperimento abbiamo attivato le regole di attivazione del sistema di abbattimento (le soglie sono state alzate appositamente per valutare i tempi di abbattimento anche in presenza di valori molto alti dei composti monitorati. In figura 33 sono mostrati gli andamenti rilevati. In figura abbiamo evidenziato l'istante di attivazione del sistema di abbattimento che come già evidenziato durante la fase di progettazione, non abbatte la CO₂ bensì lavora molto bene sui VOCs e sulle PMx. È possibile osservare un andamento decrescente delle concentrazioni dei composti evidenziando due rate ben distinti. Il primo rate maggiore nei primi 10 (meglio evidente per le PMx) poi un secondo rate minore. Questo è dovuto principalmente alle condizioni di lavoro del filtro EPA che trova nei due casi differenti concentrazioni di lavoro della su membrana filtrante. Il sistema in queste condizioni estreme riesce comunque a ripristinare valori di concentrazione "buoni" in circa 40 min di attivazione anche lavorando alla più bassa portata per qui è stato progettato (stimata di 150 m³/h). in queste condizione è acusticamente impercettibile e i consumi sono i più bassi che si possono ottenere per tale sistema filtrante. Al minuto 38 sono state aperte le finestre per

evidenziare come il ricambio di aria non forzato, in condizioni di basso inquinamento outdoor (la nostra Area di Ricerca può essere ancora considerata bassamente antropizzata), possano abbattere per diffusione IN/OUT i composti, portando i loro valori, in questo caso, a condizione di qualità “ottime”.

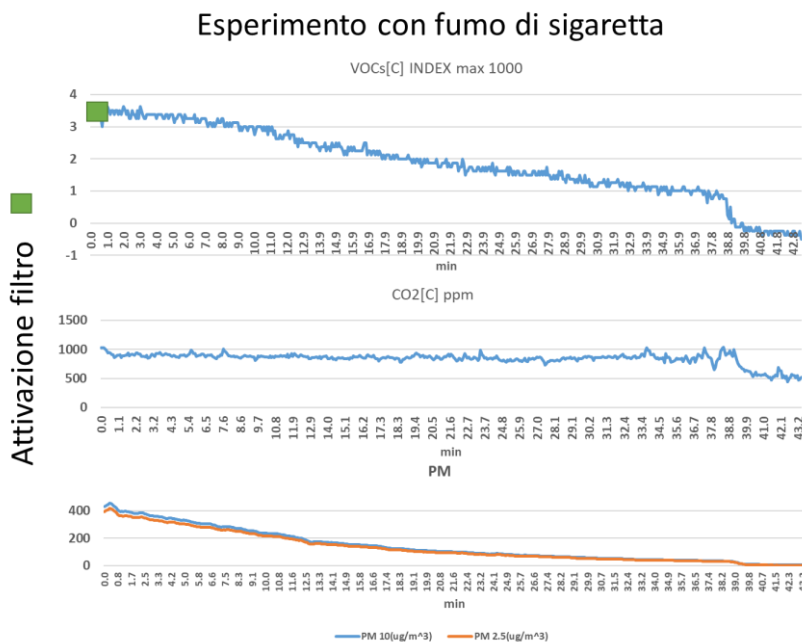


FIG. 33. Risultati della misura all’interno della stanza durante l’attivazione del sistema di abbattimento.

In figura 34 riportiamo degli istogrammi relativi al funzionamento del sistema di abbattimento in particolare riguardanti le concentrazioni di PMx.

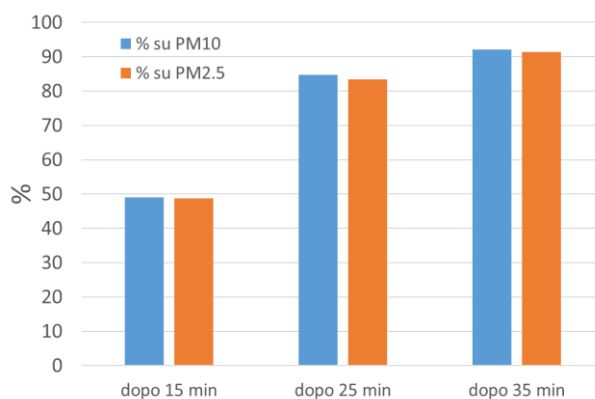


FIG. 34. Percentuale di abbattimento per il PMx in funzione del tempo di attivazione del filtro.

Durante l'esperimento sono state eseguite misure di campionamento attivo (mediante cartucce di campionamento) ed analisi di tipo analitico hanno evidenziato come le concentrazioni della nicotina vengano ridotte in tempi compatibili con il tipo di sistema di abbattimento sviluppato (figura 35). Il grafico riporta la comparazione con i VOC totali misurati dal sistema GrinBox.

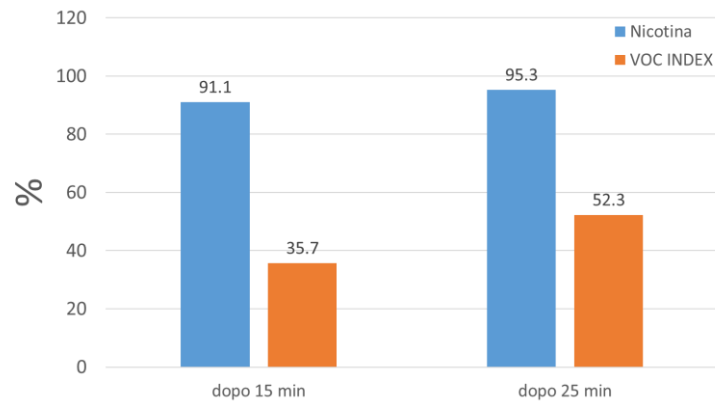


FIG. 35. Percentuale di abbattimento per la nicotina e VOC totali in funzione del tempo di attivazione del filtro.

In dati riportati evidenziano come il sistema di abbattimento lavora molto bene per la molecola della nicotina mentre ha tempi più lunghi per altri tipi di composti organici volatili.



WP7

Test e validazione del sistema di abbattimento

Introduzione

Il sistema di abbattimento è stato testato con i principali inquinanti per cui è demandato. Tutte le prove sono state effettuate mediante misurazioni in ambiente controllato (stanza di prova), dove sono state predisposte alcune sorgenti per i diversi inquinanti. Sono stati quindi monitorati, mediante strumentazione analitica, le concentrazioni di particolato, i composti organici volatili, ozono, composti carbonilici e NO_x, temperatura, e umidità relativa. Le dimensioni della stanza di prova sono 3,76x2,85x3,19 m lineari, un'area trattata di 10,72 m² e un volume utile di 34,18 m³. Al fine di documentare i test e garantire una ripetibilità e affidabilità dei test è stato prodotto un protocollo di misura che è possibile replicare per diversi tipi di sistemi di abbattimento al fine di future comparazioni delle prestazioni.

Risultati prove sperimentali

Il CADR (**Clean Air Delivery Rate**) è un valore che indica sostanzialmente il volume di aria privo di particelle inquinanti emesso da un purificatore in un determinato lasso di tempo. Il valore CADR viene ottenuto da un test sviluppato dalla AHAM (Association of Home Appliance Manufacturers) e riconosciuto dalla EPA (Environmental Protection Agency) e da altre istituzioni americane, con lo scopo di fornire uno standard uniforme secondo il quale i consumatori possono confrontare le prestazioni dei vari purificatori. Il CADR viene definito ufficialmente come: *il tasso di riduzione dei contaminanti in un ambiente controllato con l'unità accesa, meno il tasso di sedimentazione naturale quando l'unità non è attiva, moltiplicato per il volume dell'ambiente misurato in piedi cubi*. Il valore CADR viene espresso in CFM (cubic foot per minute) in America mentre da noi si usano i metri cubi all'ora. Il test CADR ufficiale è condotto in modo indipendente e i produttori non sono obbligati a sottoporvi i loro purificatori. Si tratta infatti di una certificazione volontaria.

Nella specifiche tecniche della maggior parte dei purificatori viene comunque riportato un valore CADR, anche se non sono stati certificati dalla AHAM. Probabilmente questo valore è stato ottenuto da test interni. Tutte le prove sono state effettuate mediante misurazioni in ambiente controllato. Sono stati quindi monitorati i seguenti parametri in aggiunta alle concentrazioni di particolato, composti organici volatili, ozono, composti carbonilici e NO_x: temperatura, umidità relativa.

Dimensioni della stanza di prova:

Dimensioni lineari (m)	Area trattata (m ²)	Volume utile della stanza (m ³)
3,76x2,85x3,19	10,72	34,18

Per minimizzare le interazioni tra particelle e per evitare che vi fossero perdite di particelle dovute inoltre alla naturale diffusione tra ambienti diversi il soffitto è stato ricoperto da lastre di policarbonato mentre tutte le prove sono state effettuate con stanza ermeticamente chiusa. Per garantire che non vi fossero perdite di particelle considerevoli legate alla diffusione che si verifica per via degli scambi di aria dovuti ai tassi di infiltrazione naturale sono state inoltre monitorati anche tutti gli ambienti limitrofi. All'interno della stanza durante tutte le prove è presente un ventilatore portatile necessario ad uniformare gli inquinanti emessi dalla sorgente inquinante. Come sorgente inquinante è stata scelta una sorgente che presentasse le opportune caratteristiche di reperibilità e congruenza tra una prova e la successiva, consistente in una sorgente di emissione dovuta alla combustione di miccia pirotecnica (velocità di combustione pari a 10 cm/s).

Alle misure in continuo dei principali inquinanti effettuate mediante opportuni analizzatori sono state affiancate le misure offline, effettuate tramite campionamenti dei composti organici volatili e dei composti carbonilici come mostrato nelle figure successive. Per tutte le prove è stato seguito il seguente protocollo di misura:

- Stabilizzazione delle condizioni interne alla stanza in termini di: particelle misurate, temperatura e umidità relativa (30min)
- Start della sorgente: combustione ripetibile e uniforme utilizzata come sorgente di prova per inquinamento indoor
- Stabilizzazione delle condizioni interne dopo la combustione della sorgente (15min)
- Start del sistema di abbattimento: per tutti i sistemi di abbattimento è stata impostata la massima velocità di aspirazione possibile e quindi il massimo CADR (espresso in termini di m³ di aria trattata e quindi purificata in un'ora).

Abbattimento delle polveri

Di seguito per ogni sistema vengono riportate le curve di abbattimento ottenute mediante misurazioni tramite contatore di particelle. I contatori di particelle (particle counters) vengono usati per misurare in modo automatico e in tempo reale la concentrazione di particelle in aria in funzione delle dimensioni, coprendo un ampio range dimensionale che comprende particelle di diversa dimensione: da particelle nanometriche a particelle micrometriche. Nello specifico delle seguenti misurazioni è stato utilizzato un contatore GRIMM - OPC optical particle counter, analizzatore automatico in continuo di PM (principio di misura utilizzato: diffrazione laser) maggiormente utilizzato in tutto il mondo negli studi di monitoraggio ambientale per la determinazione in real-time di PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁, PTS, conteggio totale e distribuzione dimensionale delle particelle. In figura 36 sono mostrati i range dimensionali per il PM.

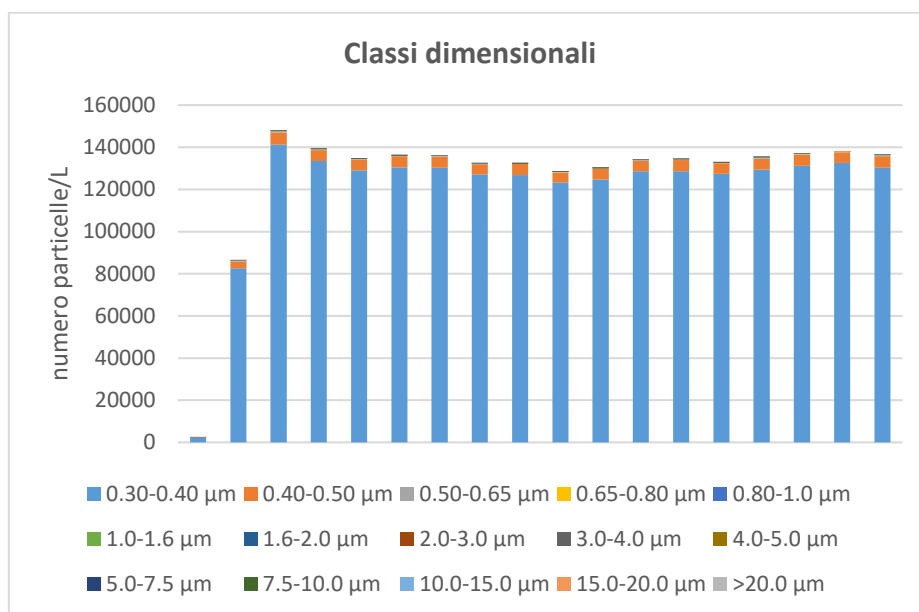


FIG. 36. Range dimensionali misurati per il PM

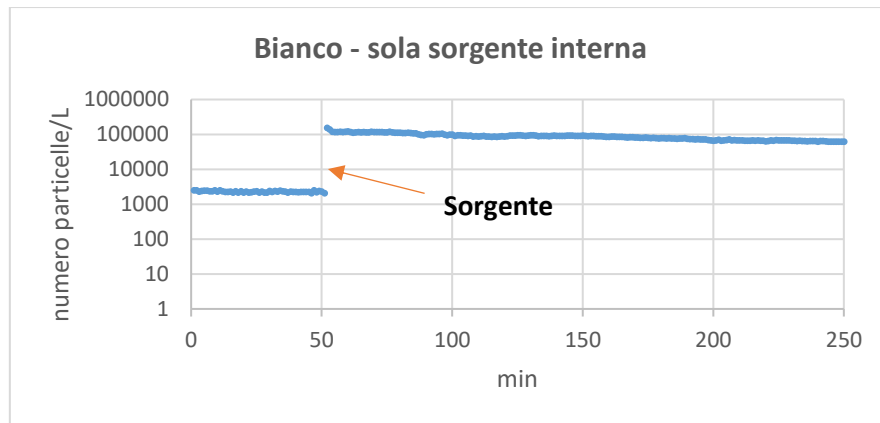


FIG. 37. Andamento del numero di particelle durante la prova di bianco in scala logaritmica (log10).

Le misure effettuate sul sistema di abbattimento proposto hanno seguito un protocollo semplificato dove al tempo t_0 è stata attivata la sorgente emissiva, all'istante t_1 è stato acceso il sistema di abbattimento. In figura 38 sono riportate le concentrazioni (esprese come numero di particelle per L) successive all'istante t_1 , corrispondente all'accensione del sistema di abbattimento.

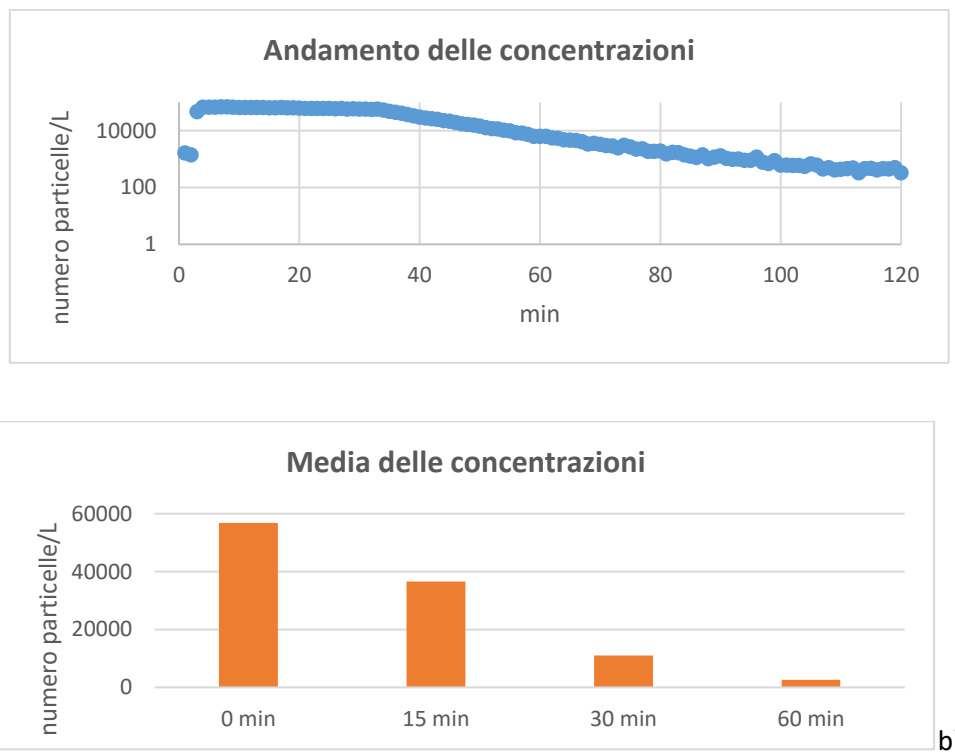


FIG. 38. Andamento del numero di particelle durante la prova di bianco in scala logaritmica (log10).

Le percentuali di abbattimento per il PM sono riportate nella seguente tabella.

0 min	15 min	30 min	60 min
	36%	81%	95%

WP8

Sperimentazione in ambienti interni del dipartimento di ingegneria, con veicoli robotici autonomi, del sistema di monitoraggio sviluppato da CNR IIA.

Sono stati condotti due tipi di esperimenti esplorando un'ambiente sperimentale con un ROBOT di piccole taglie integrato con il sistema di monitoraggio GrinBox. Nel primo esperimento sono state posizionate nell'ambiente sperimentale tre sorgenti diffusive (piccoli contenitori in vetro) di Acetone. Il robot in questo esperimento ha viaggiato in modo lineare verso le tre sorgenti (con l'ordine 1,2,3) fermandosi per cinque minuti a due diverse distanze (40 cm, 10 cm) e ripartendo verso la seguente percorsi diversi indicati nelle seguenti figure. In particolare nelle figure 39-41 sono riportati i dettagli del primo esperimento.

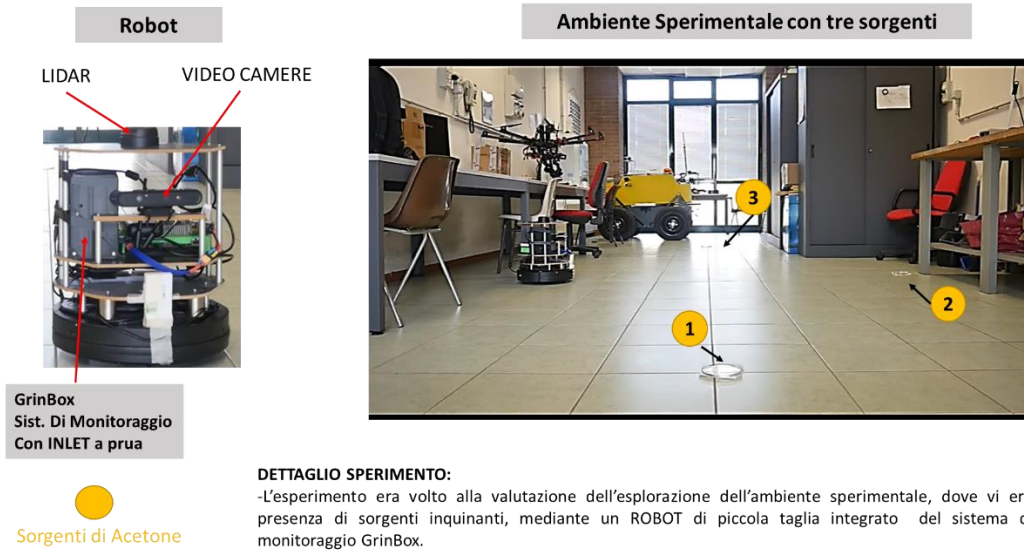


FIG.39. Foto del reale ambiente sperimentale e disposizioni sorgenti di Acetone.

Ambiente sperimentale e fasi iniziali

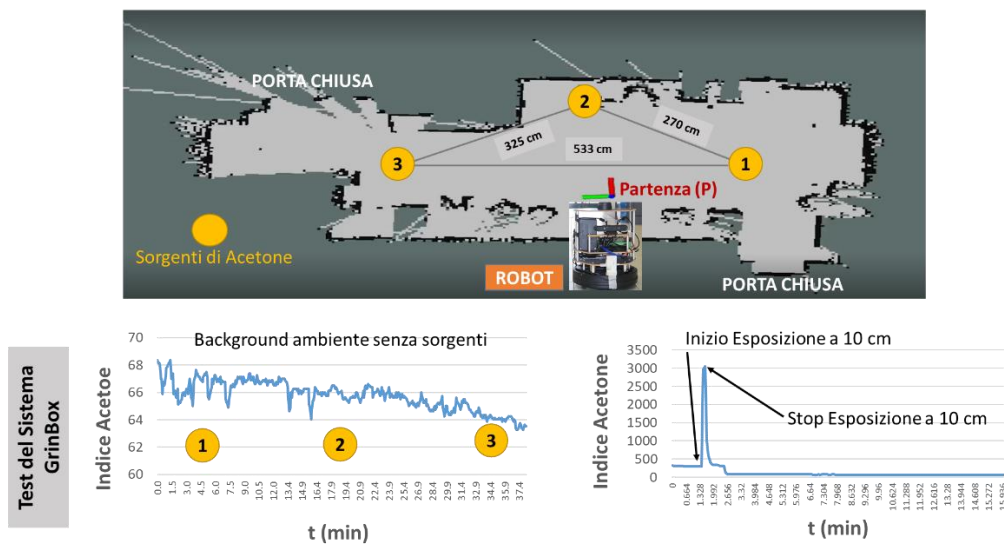


FIG.40. Dettagli sorgenti di acetone e prova di background (senza sorgenti) e prova per test risposta sistema GrinBox con sorgente vicina.

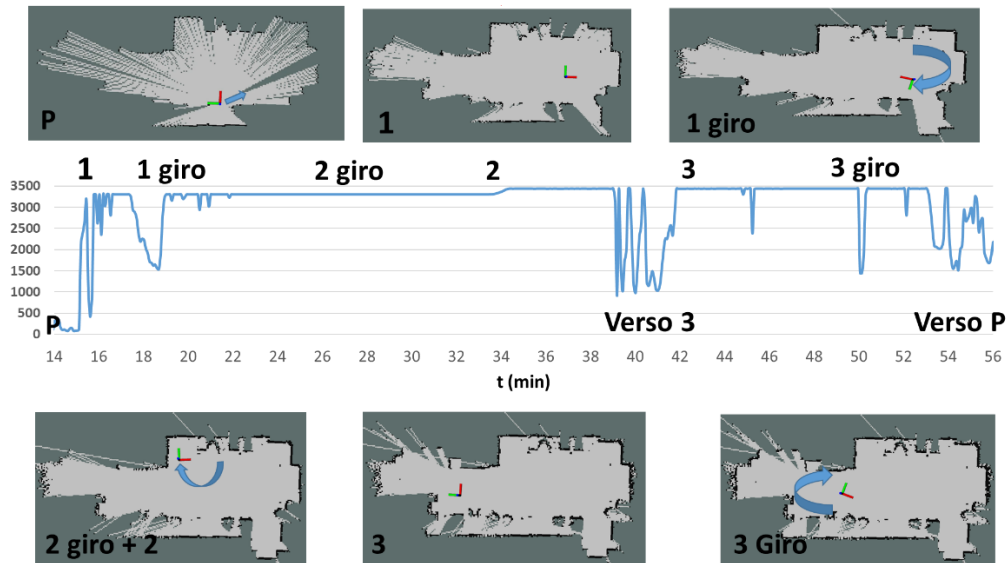
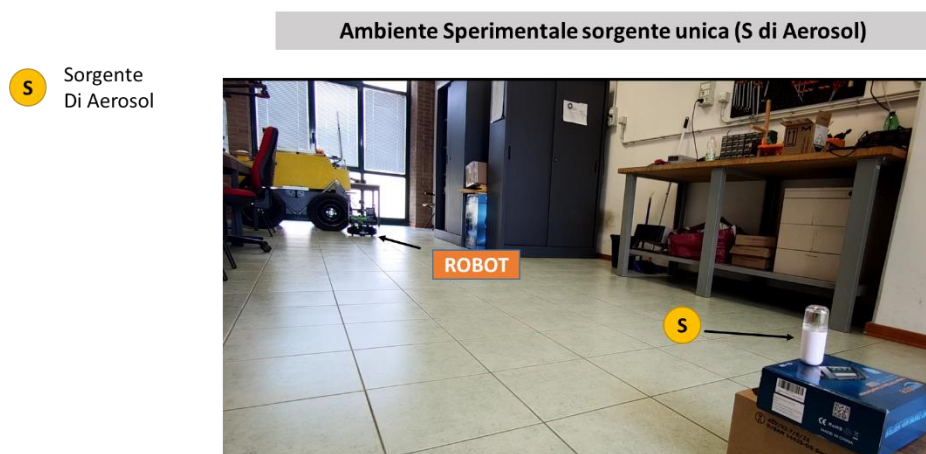


FIG.41. Dati lidar del ROBOT e cronogramma della risposta del sistema GrinBox montato su di esso.

Nel secondo esperimento è stata utilizzata una sorgente puntuale di aerosol (prodotto da nebulizzatore con acqua distillata generatore di particolato PM2.5 e PM10) e si è utilizzato il ROBOT con integrato il sistema di monitoraggio GrinBox per valutare la risposta e il possibile utilizzo in campi di applicazione di ricerca sorgenti nel settore della sicurezza come nel caso precedente.



DETTAGLIO SPERIMENTO:
 -L'esperimento era volto alla valutazione dell'esplorazione dell'ambiente sperimentale, dove vi era presenza di sorgenti inquinanti (S), mediante un ROBOT di piccola taglia integrato del sistema di monitoraggio GrinBox. In questo caso l'approccio alla sorgente è avvenuto con un profilo particolare riportato di seguito e poi tornando in base.

FIG.42. Foto del reale ambiente sperimentale e disposizioni della sorgente di aerosol (S).

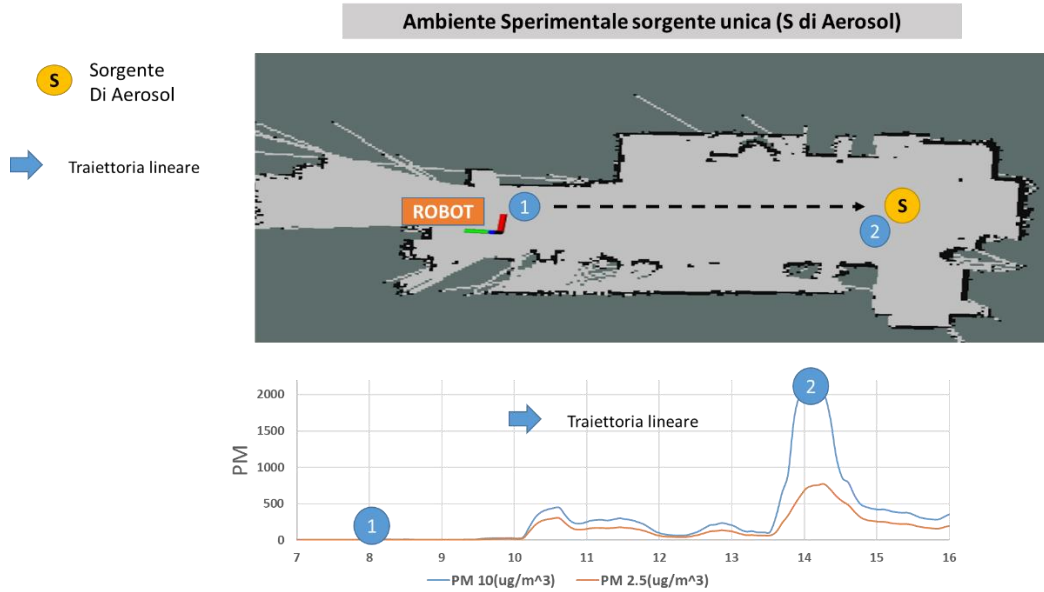


FIG.43. Dati lidar del ROBOT e cronogramma della risposta del sistema GrinBox in particolato della parte polveri sottili.

Data

30 Giugno 2023

Responsabile scientifico

Ing. Emiliano Zampetti

L'impatto ambientale del sistema di misura GRINBOX. Analisi sull'intero ciclo di vita (LCA)

Autori: Patrizio Tratzi, Flaminia Fois, Marco Torre

1. Executive Summary

Questa attività è stata incentrata sulla valutazione degli impatti ambientali secondo una metodica di Life Cycle Assessment (LCA), così da poter valutare anche gli impatti a monte e a valle della costruzione e utilizzo del prodotto. Sono state prese in considerazione le categorie di impatto ambientale più rilevanti per questo tipo di prodotto, in particolare Human toxicity (tiene conto della persistenza ambientale, dell'accumulo nella catena alimentare umana e della tossicità di una sostanza chimica e usa l'1,4-diclorobenzene come sostanza di riferimento), Fossil depletion (considera l'impoverimento dei giacimenti di risorse fossili e la crescente necessità di utilizzare fonti non convenzionali di combustibili fossili), Climate change (utilizza i kg di CO₂ equivalenti come indicatore e considera gli effetti delle diverse specie chimiche sul riscaldamento globale), Metal depletion (per esprimere il consumo di risorse minerarie metallifere) e Freshwater Ecotoxicity (stima il potenziale danno causato dalle sostanze in base alla loro tossicità, persistenza e potenziale di bioaccumulo negli ecosistemi di acqua dolce. Considera la concentrazione e la durata dell'esposizione della sostanza nell'acqua).

Tra i fattori che sono emersi come principali si evidenziano i consumi energetici per il funzionamento dell'unità logica (in questo specifico caso, un Raspberry Pi 4) e gli impatti legati alla produzione e smaltimento dei sensori elettrochimici, che sono caratterizzati da una durata molto più breve rispetto a tutte le altre componenti e quindi necessitano di due sostituzioni all'interno dei 5 anni. Valutando specificatamente il parametro della tossicità per gli esseri umani, si evidenzia come proprio i sensori elettrochimici abbiano l'impatto maggiore in quanto gli unici componenti ad incorporare elementi potenzialmente dannosi nella fase di produzione o di smaltimento.

L'analisi potenzialmente sovrastima gli impatti legati al consumo e suggerisce che in futuro gli impatti possano essere ridotti sostituendo l'unità logica con una con consumi inferiori, o scegliendo sensori elettrochimici con una maggiore durata.

2. Metodologia

Il presente studio è basato su un'analisi di tipo Life Cycle Assessment (LCA). Questo tipo di analisi valuta i potenziali impatti ambientali lungo l'intero ciclo di vita di un prodotto (fasi di produzione, distribuzione, utilizzo e fine vita) o servizio. Ciò include anche i processi a monte (es. fornitori) e a valle (es. gestione dei rifiuti) associati a tutte le fasi considerate. Inoltre, copre tutti gli input rilevanti provenienti dall'ambiente (ad es. minerali e petrolio greggio, acqua) nonché le emissioni nell'aria, nell'acqua e nel suolo (ad es. anidride carbonica e ossidi di azoto). Per la scelta delle metodiche dell'analisi stessa sono state prese in considerazione pubblicazioni scientifiche su riviste peer-reviewed e report tecnici incentrati su problemi analoghi. Per lo svolgimento delle analisi è stato impiegato il software OpenLCA integrato con il database ecoinvent 3.7.1, mentre la valutazione degli impatti è stata eseguita secondo indicatori ReCiPe (Goedkoop et al., 2009; Huijbregts et al., 2016).

Sono stati scelti cinque specifici indicatori di impatto ambientale, selezionati per la loro informatività e specificità.

- **Human toxicity:** Il fattore di caratterizzazione della tossicità umana tiene conto della persistenza ambientale, dell'accumulo nella catena alimentare umana e della tossicità di una sostanza chimica. La sostanza chimica 1,4-diclorobenzene è stata utilizzata come sostanza di riferimento nei calcoli midpoint.
- **Fossil depletion:** Questo fattore, espresso in kg di petrolio equivalenti, considera l'impovertimento dei giacimenti di risorse fossili e la crescente necessità di utilizzare fonti non convenzionali di combustibili fossili. Infatti, questi escono dai pozzi senza apporto di energia solo fino a un certo punto. Sarà poi ancora possibile estrarne di più, ma ciò aumenterà i costi e il fabbisogno energetico di produzione. Superata una certa soglia, diventa anche possibile estrarre petrolio da luoghi (acque profonde, artico) e da risorse non convenzionali (petrolio extra pesante, olio bituminoso) o utilizzare tecnologie costose (conversione di gas o carbone in liquidi). Ciò significa che l'aumento dei costi e dell'energia non è causato solo da una graduale diminuzione della qualità delle risorse, ma dalle risorse convenzionali che si esauriscono e devono essere sostituite da risorse non convenzionali più costose.

- **Climate change:** Questo fattore, molto comunemente impiegato, utilizza i kg di CO₂ equivalenti come indicatore e considera gli effetti delle diverse specie chimiche sul riscaldamento globale.
- **Metal depletion:** per l'analisi si è usato questo indice, espresso in kg di Ferro equivalenti, per esprimere il consumo di risorse minerarie metallifere. Questo parametro si concentra sull'impoverimento dei giacimenti.
- **Freshwater ecotoxicity:** si concentra sui potenziali effetti nocivi di una sostanza sugli ecosistemi d'acqua dolce. Valuta la tossicità di sostanze chimiche o sostanze rilasciate nei sistemi di acqua dolce, come fiumi, laghi e corsi d'acqua. La categoria di impatto misura il potenziale dannoso per gli organismi acquatici, inclusi pesci, invertebrati e alghe. Il parametro considera la concentrazione e la durata dell'esposizione della sostanza nell'acqua, nonché la sensibilità delle diverse specie acquatiche agli effetti tossici della sostanza.

3. Obiettivi e portata dello studio

Tutti i componenti legati alla sensoristica, al funzionamento dei sensori, e all'acquisizione e allo stoccaggio delle misure sono stati presi in considerazione. La durata dell'intero sistema è stata valutata pari a 5 anni di uso intensivo, pari al 90% del tempo utile (7880 ore in un anno). Su questo tempo è stata quindi tarata la porzione di impatto derivante da ogni componente: per le componenti con una durata stimata maggiore, solo una parte degli impatti totali di produzione e fine vita è stata caricata al sistema GRINBOX (ad esempio, per una componente con vita stimata pari a 10 anni solo metà degli oneri ambientali è stata aggiunta alla somma finale per l'intero sistema), mentre per le componenti con una durata stimata inferiore a 5 anni è stato considerato l'impatto anche delle sostituzioni (ad esempio, per una componente con vita stimata pari a 2 anni sono stati considerati gli impatti di 2 interi componenti e mezzo).

L'unità di purificazione dell'aria è stata analizzata a parte, in quanto significativamente più importante sia per dimensioni che per consumi rispetto a tutti gli altri componenti, e conseguentemente anche da un punto di vista degli impatti.

Non sono considerati l'imballaggio, il montaggio e il trasporto dei componenti; in altre parole, viene trascurato l'impatto ambientale dovuto alla produzione di componenti in diversi siti del mondo. Analogamente, l'alloggiamento del sistema non è stato preso in considerazione poiché può facilmente variare.

4. Inventario

In Tabella 1 e Tabella 2 vengono riassunti tutti i componenti presi in considerazione in questa analisi, con alcuni dati utili ai fini dell'analisi stessa.

Nome	PID-AH2 Photo Ionisation Detector	NO2-A1 Small	H2S-A1 Small	CO-A1 A- Series Carbon Monoxide sensor	COZIR- LP-5000	Nova PM sensor SDS011
Peso	8g	6g	6g	6g	2.5g	26g
Durata	5y	2y	2y	2y	5y	1y
Consumi	100mWh	0	0	0	3.5mWh	1Wh
Note	Misura dei VOC	Sensore elettrochimico	Sensore elettrochimico	Sensore elettrochimico	Sensore NDIR	Sensore laser

Tabella 1: Sensori inseriti nel sistema GRINBOX

Nome	Pompa a membrana KNF NMP09S	Raspberry Pi vers. 4	Tubazioni e camera di misura	Raccordi swagelock	Unità purificazione aria Levoit
Peso	23g	N/A	30g	24g	3kg
Durata	5y	8y	5y	5y	5y*
Consumi	0.7Wh	5Wh	0	0	26Wh

Tabella 2: Altri componenti del sistema GRINBOX. * il filtro HEPA ha una vita stimata di 6 mesi

Per quanto riguarda i sensori, ci si è riferiti alle schede tecniche del singolo prodotto per derivare un inventario; in caso di informazioni mancanti si è ricorsi ad una stima ragionata delle informazioni mancanti. Un discorso analogo è stato fatto per l'unità di purificazione dell'aria, avvalendosi anche del database ecoinvent 3.7.1 per il filtro HEPA, con vita stimata di 6 mesi.

Per quanto riguarda la pompa a membrana si è ricorsi a quanto già presente nel database ecoinvent 3.7.1. Il Raspberry Pi versione 4 è stato modellato adattando (Loubet et al., 2023). Tubazioni, camera di misura e raccordi, in quanto componenti molto semplici, sono stati modellati direttamente basandosi su materiale e peso.

Per brevità non vengono presentati gli inventari dettagliati di ogni singolo componente, che comunque non aggiungerebbero informazioni particolarmente utili alla trattazione e alle conclusioni dell'analisi. A titolo di esempio, sono riportati in Tabella 3 e Tabella 4 gli inventari per uno dei sensori elettrochimici e per il Raspberry Pi 4.

Item	Quantità
Policarbonato (produzione, stampaggio, smaltimento)	5g
Acido solforico (produzione, smaltimento)	0.3g
Platino (produzione, lavorazione, smaltimento)	0.06g
Ottone (produzione, lavorazione, smaltimento)	0.24g
Permanganato di potassio (produzione, smaltimento)	0.2g
Diossido di manganese (produzione, smaltimento)	0.2g

Tabella 3: Inventario dettagliato per un sensore elettrochimico

Item	Quantità
Capacitore	2.15g
Diodo	0.128g
Connettore	20g
Induttore	0.013g
Circuiti integrati	8g
LED	0.7g
Resistore	0.294g
Transistor	1.779g

Tabella 4: Inventario dettagliato per Raspberry Pi 4, da (Loubet et al., 2023)

5. Risultati

I risultati vengono presentati in tre grafici diversi, uno che evidenzia solo gli impatti di produzione e fine vita dei componenti, uno che invece prende in considerazione i consumi dei vari componenti sui 5 anni, e l'ultimo, riassuntivo, che somma questi impatti. I risultati per l'unità di purificazione dell'aria sono presentati in un quarto grafico.

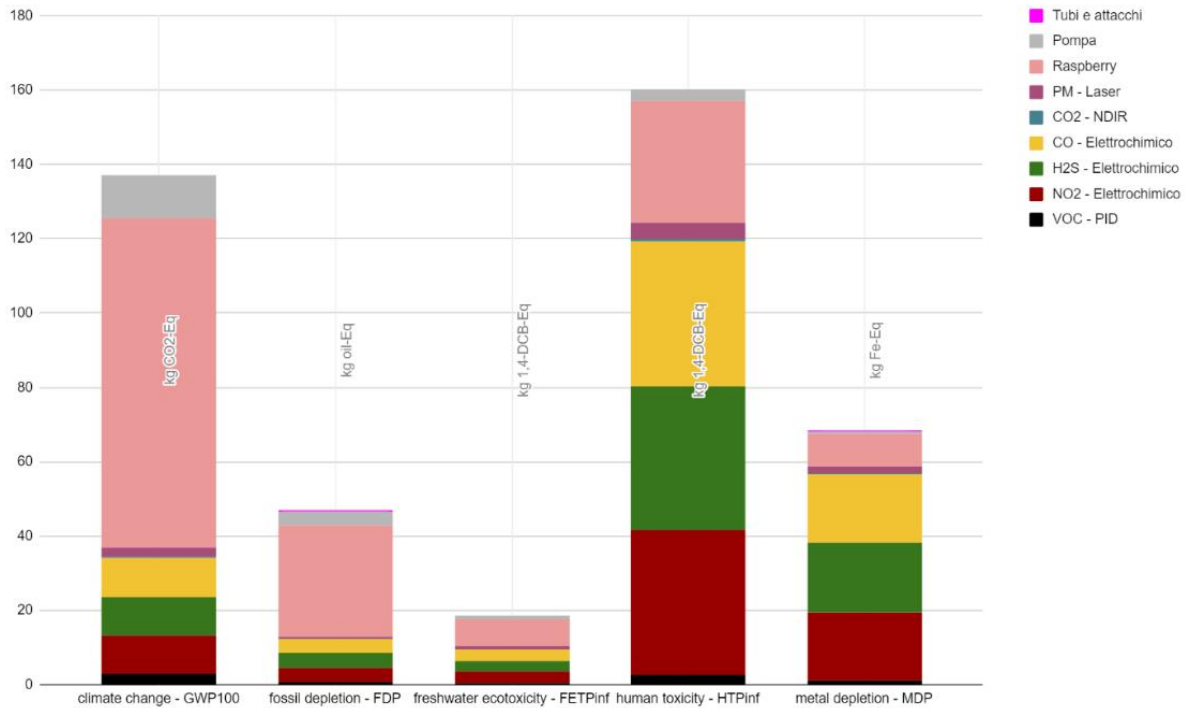


Figura 1 Risultati complessivi dell'analisi.

Nel grafico riportato in Figura 1, le diverse componenti del sistema di misura GRINBOX sono valutate rispetto alle categorie di maggiore rilevanza (climate change, fossil depletion, freshwater ecotoxicity, human toxicity e metal depletion). È possibile notare come, complessivamente, l'impatto maggiore sia riscontrato nel Raspberry Pi per il quale l'impatto è il più elevato in tutte le categorie ad eccezione del *metal depletion*. Questi risultati sono dovuti soprattutto al consumo energetico superiore rispetto agli altri componenti (fino a tre ordini di grandezza rispetto al sensore a CO₂), come può essere osservato nel grafico che valuta i consumi dei diversi componenti (Figura 2). Al fine di ridurre i consumi in futuro, è possibile valutare la possibilità di una sua sostituzione con un sistema più semplice e con un consumo inferiore.

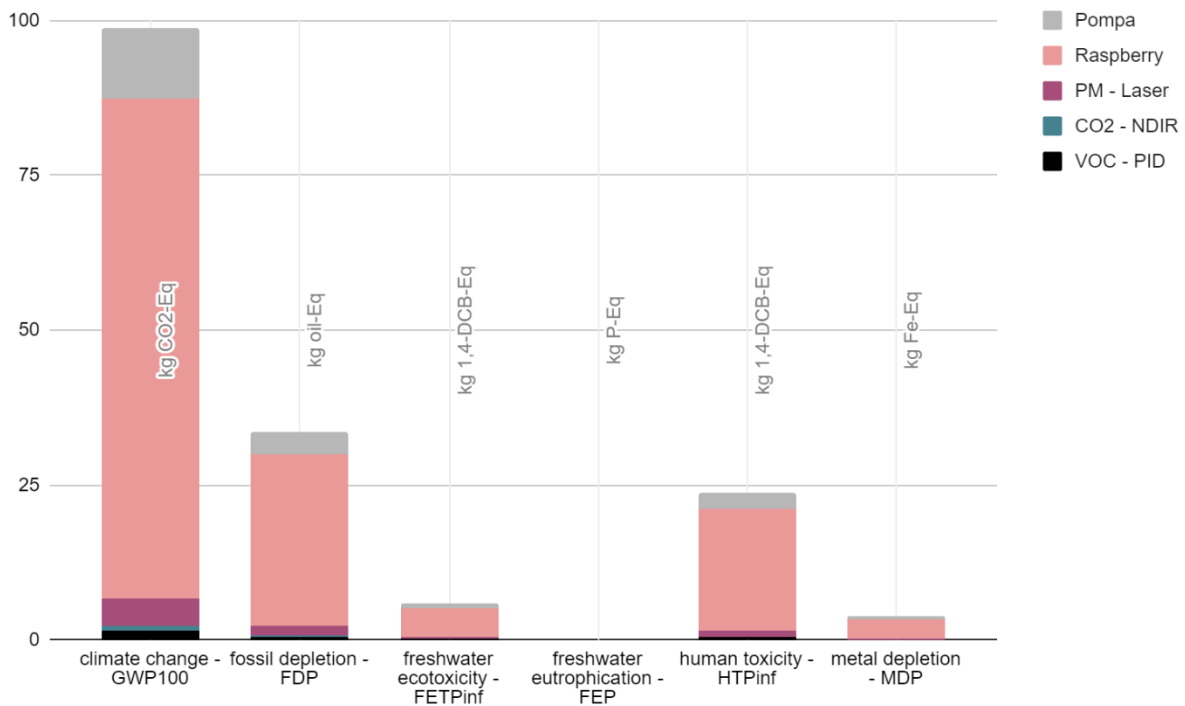


Figura 2 Impatti di produzione e fine vita dei componenti

Tenendo invece in considerazione il grafico che evidenzia solo gli impatti di produzione e fine vita dei componenti (Figura 3), escludendo quindi la componente dei consumi, risultano fortemente impattanti i sensori elettrochimici; questi ultimi, infatti, rispetto ai sensori che utilizzano altre tecnologie, presentano un tempo di vita inferiore e, di conseguenza, una necessità di sostituzione più frequente. Questo potrebbe essere evitato utilizzando in futuro dei sensori che abbiano un tempo di vita più lungo e quindi ridurre il numero delle sostituzioni. In questo modo, sarebbe possibile avere degli effetti positivi sull'impatto ambientale complessivo, nonostante una maggiore robustezza possa comportare un aumento degli impatti dovuti a produzione e smaltimento del singolo sensore.

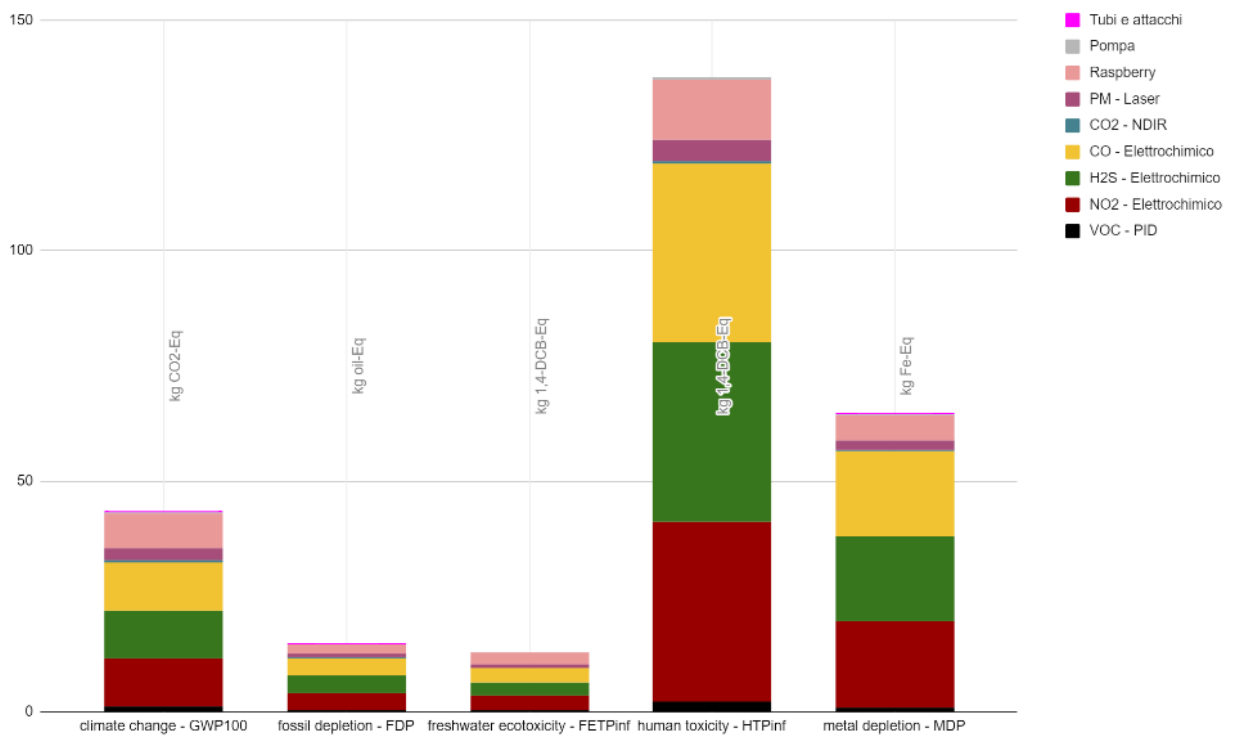


Figura 3 Consumi dei diversi componenti sui 5 anni

Come evidenziato dalla Figura 4, l'unità di purificazione dell'aria impatta per almeno 5-6 volte di più rispetto alla somma degli altri componenti per le categorie principali, quali climate change e human toxicity, e anche di più in altre categorie. Questo è una diretta conseguenza dei consumi nettamente superiori rispetto ai restanti componenti, che si attestano tutti al di sotto del wattora, ma anche rispetto al Raspberry Pi che raggiunge i 5 Wh contro i 26 Wh del purificatore d'aria Levoit, ma anche semplicemente della quantità di materiali necessari alla produzione dell'oggetto e che poi devono essere smaltiti.

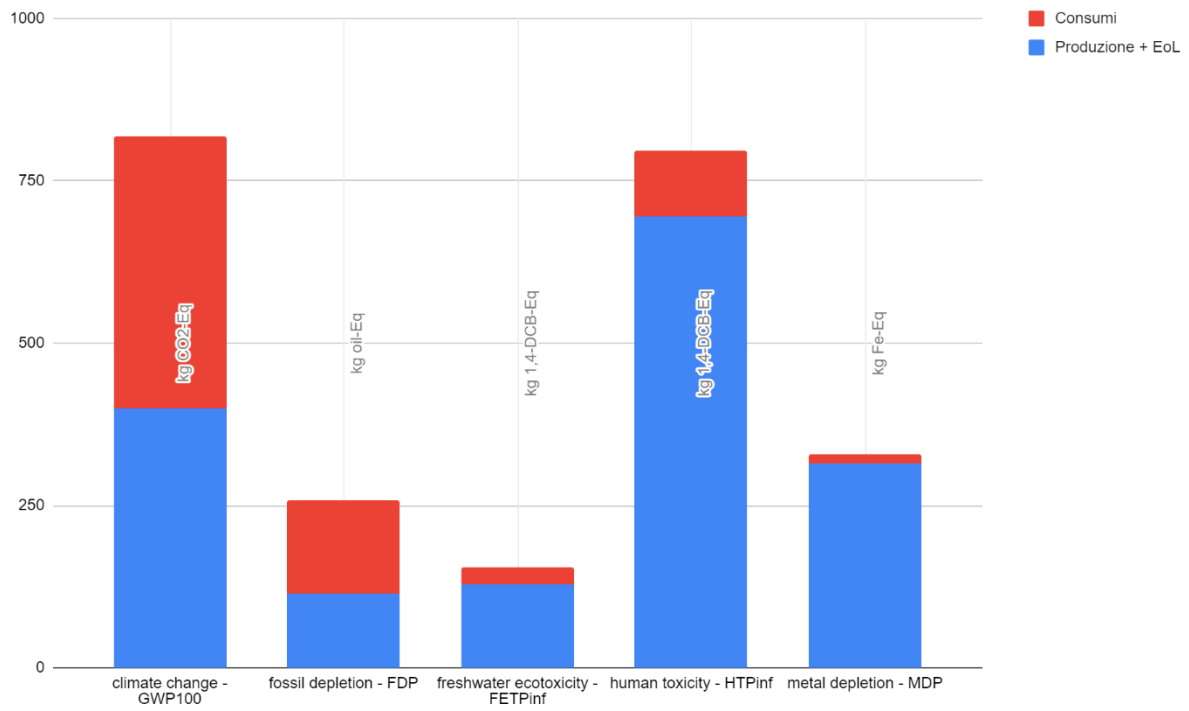


Figura 4: Impatti ambientali per l'unità di purificazione dell'aria

6. Conclusioni

L'analisi ha permesso di stimare gli impatti ambientali della produzione, smaltimento e utilizzo del sistema GRINBOX. In generale, gli impatti possono considerarsi piuttosto bassi, anche in virtù delle dimensioni estremamente contenute dei componenti, e conseguentemente dei materiali impiegati per la loro produzione.

I consumi energetici derivanti dall'uso del sistema si sono dimostrati uno dei fattori più importanti per quanto riguarda gli effetti sui cambiamenti climatici in virtù del mix energetico preso in considerazione, che contiene ancora una cospicua componente termoelettrica con combustibili fossili.

Un altro fattore importante per tutti i parametri considerati è stata la durata più ridotta dei sensori elettrochimici, pari a 2 anni contro i 5-15 anni degli altri componenti, che quindi ha più che raddoppiato l'impatto del singolo sensore, per simulare la necessità di una sostituzione.

Per sviluppi futuri si può ipotizzare la sostituzione del Raspberry Pi 4 come unità logica con un sistema più semplice e con consumi inferiori, quale ad esempio Arduino. Similmente, la scelta di sensori elettrochimici più costosi, ma al contempo più robusti, può comportare impatti maggiori per la produzione e smaltimento del singolo oggetto, ma potrebbe evitare la sostituzione dei sensori durante l'uso e conseguentemente ridurre gli impatti ambientali complessivi. Allo stesso modo, per ridurre ulteriormente l'impatto totale, è possibile valutare una sostituzione del sistema di purificazione dell'aria con uno che presenti dei consumi minori.

7. Bibliografia

Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., & Van Zelm, R. (2009).

ReCiPe 2008. A Life Cycle Impact Assessment Method Which Comprises Harmonised Category Indicators at the Midpoint and the Endpoint Level, 1, 1–126.

Huijbregts, M. A., Steinmann, Z. J., Elshout, P. M., Stam, G., Verones, F., Vieira, M. D. M.,

Hollander, A., Zijp, M., & van Zelm, R. (2016). *ReCiPe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level report I: characterization.*

Loubet, P., Vincent, A., Collin, A., Dejous, C., Ghiotto, A., & Jeco, C. (2023). Life cycle assessment

of ICT in higher education: A comparison between desktop and single-board computers.

The International Journal of Life Cycle Assessment, 28(3), 255–273.

<https://doi.org/10.1007/s11367-022-02131-z>



LINEE GUIDA PER UNA PROCEDURA DI MONITORAGGIO E CONTROLLO DELLA QUALITÀ DELL'ARIA NEGLI AMBIENTI *INDOOR*

Autori: Serena Santoro, Catia Balducci, Ettore Guerriero, Paola Romagnoli, Marco Torre, Francesca Vichi, Emiliano Zampetti



Sommario

Introduzione.....	3
1. Parametri microclimatici e inquinanti	4
1.1 Temperatura e umidità relativa	4
1.2 Anidride carbonica (CO ₂)	5
1.3 Particolato atmosferico (PM)	5
1.4 Diossido di azoto (NO ₂)	6
1.5 Monossido di carbonio (CO).....	6
1.6 Composti Organici Volatili Non Metanici Totali (TCOVNM).....	7
2. Modalità di esecuzione della procedura di monitoraggio.....	7
2.1 Caso specifico: modalità di esecuzione della procedura di monitoraggio della qualità dell'aria interna tramite il sistema realizzato nell'ambito del progetto GrIN- BOX.....	9
3. Migliori tecnologie disponibili per il controllo dei contaminanti	9
4. Definizione del livello della qualità dell'aria interna	10
Appendice A - Esempi di valori limite stabiliti a livello normativo o raccomandati per la CO ₂ <i>indoor</i>	12
Appendice B - Esempi di valori limite stabiliti a livello normativo o raccomandati per il particolato atmosferico – PM _{2,5} e PM ₁₀ <i>indoor</i>	13
Appendice C - Esempi di valori limite stabiliti a livello normativo o raccomandati per il diossido di azoto (NO ₂) <i>indoor</i>	14
Appendice D - Esempi di valori limite stabiliti a livello normativo o raccomandati per il monossido di carbonio (CO) <i>indoor</i>	15
Appendice E - Esempi di valori limite stabiliti a livello normativo o raccomandati per i Composti Organici Volatili totali (TVOC) <i>indoor</i>	16
Bibliografia	17



Introduzione

L'inquinamento *indoor* riguarda i luoghi confinati di vita e di lavoro non industriali come case, scuole e uffici. Solo in tempi più recenti è emersa l'importanza di acquisire maggiori conoscenze sull'inquinamento negli ambienti chiusi. L'importanza di garantire una buona qualità dell'aria interna e di analizzare le lacune in termini di conoscenze sul tema dell'*indoor* è stata sottolineata anche nel "Piano d'azione dell'UE: Verso l'inquinamento zero per l'aria, l'acqua e il suolo"(COM 2021 400 final), presentato dalla Commissione europea nel 2021 [1].

Negli ambienti *indoor* spesso la normale composizione chimica dell'aria può cambiare per la presenza di diverse sorgenti sia interne che esterne. Tra le fonti interne rientrano attività umane come la combustione di biomasse per il riscaldamento, il fumo di sigaretta, la cottura dei cibi, le emissioni dalle suppellettili, l'uso di prodotti sia per la cura personale che per l'igiene della casa, l'utilizzo di particolari strumenti quali ad esempio stampanti e fotocopiatrici. A causa dell'infiltrazione dall'esterno tali ambienti possono risentire anche di altre fonti come, ad esempio, il traffico veicolare e le emissioni provenienti dagli impianti industriali.

Diversi studi hanno dimostrato che in case, scuole e uffici l'aria può essere più inquinata rispetto a quella esterna. Tra le cause rientrano due fattori concomitanti: la diminuzione della diluizione degli inquinanti legata ai ricambi di aria e il rallentamento dei processi di degradazione che avvengono solitamente in *outdoor*.

La qualità dell'aria interna è definita accettabile quando "non sono presenti contaminanti in concentrazione superiore ai limiti consentiti e quando una larga maggioranza delle persone esposte non esprime insoddisfazione" [2].

Le presenti linee guida hanno lo scopo di definire, a partire dall'analisi della letteratura scientifica e delle attuali norme tecniche disponibili, una procedura di monitoraggio e controllo della qualità dell'aria degli ambienti *indoor*. Nel documento è inoltre riportato un focus specifico sull'utilizzo del sistema di monitoraggio realizzato nell'ambito del progetto GrIN-BOX.

Simboli

CO = monossido di carbonio

CO₂ = anidride carbonica

NO₂= diossido di azoto

PM_{2,5} = particolato atmosferico con diametro aerodinamico equivalente inferiore o uguale ai 2,5 µm

PM₁₀ = particolato atmosferico con diametro aerodinamico equivalente inferiore o uguale ai 10 µm

Unità di misura

°C = grado Celsius

K = Kelvin

Pa = pascal

mg/m³ = milligrammi di inquinante per metro cubo di aria



$\mu\text{g}/\text{m}^3$ = microgrammi di inquinante per metro cubo di aria

ppm = parti di inquinante per milione di parti di aria

1. Parametri microclimatici e inquinanti

A livello nazionale le uniche norme relative all'inquinamento *indoor* stabiliscono limiti di emissione dai materiali. Si tratta del D.M. 10 ottobre 2008 del Ministero della Salute [3] che prevede un limite di emissione di formaldeide pari a 0,1 ppm (equivalente a $0,124 \mu\text{g}/\text{m}^3$) per tutti i pannelli a base di legno ed i manufatti con essi realizzati (es. mobili) in ambienti interni e del D.M. 23 giugno 2022 n. 256 [4] relativo ai CAM (Criteri Ambientali Minimi) edilizia. Tale decreto ha stabilito dei limiti in termini di emissioni di Composti Organici Volatili (COV), di formaldeide e di altre sostanze emesse dai materiali (es. controsoffitti, rivestimenti, pavimentazioni).

Tuttavia, in Italia non esiste attualmente una legislazione specifica in materia di inquinamento *indoor*.

Nei paragrafi successivi sono presentati i principali parametri microclimatici e inquinanti per la valutazione della qualità dell'aria interna. Al termine di tale descrizione, nel paragrafo 4 è riportata una tabella in cui per ciascun inquinante è indicato un valore guida elaborato sulla base di quanto stabilito o raccomandato da alcuni Paesi europei ed extraeuropei e di quanto indicato dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS).

I parametri e gli inquinanti illustrati possono essere misurati tramite il sistema di monitoraggio realizzato nell'ambito del progetto GrIN-BOX.

1.1 Temperatura e umidità relativa

La temperatura dell'aria è un parametro fondamentale da misurare per la valutazione della qualità di un ambiente *indoor*. Secondo il Ministero della Salute la temperatura ideale in un ambiente, considerando un'attività fisica moderata, un abbigliamento adeguato e in assenza di irraggiamento in inverno è di 19-22°C mentre d'estate i valori dovrebbero essere compresi tra 24 e 26°C (Tabella 1).

Viene poi generalmente utilizzato come parametro l'umidità relativa, definita come il rapporto tra la massa di vapore acqueo contenuto in un certo volume di aria e la massima massa di vapore acqueo che lo stesso volume d'aria riesce a contenere nelle stesse condizioni di pressione e di temperatura. Secondo il Ministero della Salute in un ambiente la condizione ideale è che il tasso di umidità relativa sia tra il 40 e il 50% d'inverno e tra il 50 e il 60% d'estate (Tabella 1).

Tabella 1 – Condizioni microclimatiche ottimali [5]

Condizioni microclimatiche ottimali		
Stagione	Temperatura dell'aria (°C)	Umidità relativa (%)
Inverno	19-22	40-50
Estate	24-26	50-60



1.2 Anidride carbonica (CO₂)

La CO₂ è un gas presente in atmosfera ad una concentrazione media di 400 ppm il cui innalzamento negli ambienti *indoor* è dovuto principalmente alla produzione come sottoprodotto del sistema respiratorio. È inoltre prodotta dai processi della combustione. Sebbene a concentrazioni ridotte non sia un inquinante, la misura della concentrazione di CO₂ può servire da indicatore o segnale di avvertimento di fenomeni di accumulo di inquinanti all'interno degli ambienti in quanto concentrazioni di anidride carbonica maggiori di 1000 ppm sono generalmente indicative di inadeguato ricambio dell'aria [6] e riducono il benessere abitativo.

Norme tecniche di riferimento per la determinazione in ambienti *indoor*:

- UNI EN ISO 16000-1:2006 "Aria in ambienti confinati - Parte 1: Aspetti generali della strategia di campionamento"[7]
- UNI EN ISO 16000-26:2012 "Aria in ambienti confinati—Parte 26: Strategia di campionamento per l'anidride carbonica (CO₂)" [8]

1.3 Particolato atmosferico (PM)

Il particolato atmosferico (*Particulate Matter* o PM) è l'insieme di particelle solide e liquide sospese in aria e trasportate grazie al movimento delle masse d'aria. Solitamente l'acronimo PM è riportato con un numero accanto che indica la grandezza del diametro aerodinamico equivalente delle particelle di diverse forme che si comportano aerodinamicamente come particelle sferiche con il diametro indicato nel pedice della sigla PM. Le particelle che si comportano come le particelle sferiche di dimensioni maggiori di 10 µm hanno un tempo medio di vita nell'atmosfera che varia da pochi minuti ad alcune ore e possono essere trasportate in aria per una distanza massima di 1-10 Km. Le particelle di dimensioni inferiori o pari ai 10 µm hanno un tempo medio di vita da pochi giorni fino a diverse settimane e possono venire veicolate dalle correnti atmosferiche per distanze fino a centinaia di Km a seconda delle dimensioni. Per quanto riguarda gli effetti sulla salute umana è molto importante la determinazione delle dimensioni e della composizione chimica delle particelle. Le dimensioni determinano il grado di penetrazione all'interno del sistema respiratorio, mentre le caratteristiche chimiche determinano le proprietà tossiche in termini di contenuto in inquinanti (es. Idrocarburi Policiclici Aromatici - IPA, metalli pesanti, solfati, nitrati). Sono definite polveri fini le particelle di polvere con un diametro aerodinamico equivalente inferiore o uguale a 10 µm (PM₁₀), in grado di penetrare nel tratto respiratorio superiore (naso, faringe e trachea) e le particelle con diametro inferiore o uguale a 2,5 µm (PM_{2,5}), in grado di penetrare profondamente nei polmoni. Le particelle che si depositano nel tratto superiore possono causare effetti irritativi locali quali secchezza e infiammazione. Le particelle più fini che si depositano nel tratto tracheobronchiale o addirittura negli alveoli possono causare aggravamento delle malattie respiratorie croniche (es. asma, bronchite), infiammazioni ed eventualmente neoplasie.



Norme tecniche di riferimento per la determinazione in ambienti *indoor*:

- UNI EN ISO 16000-1:2006 "Aria in ambienti confinati - Parte 1: Aspetti generali della strategia di campionamento [7]
- ISO 16000-34: 2018 "Indoor air — Part 34: Strategies for the measurement of airborne particles" [9]
- ISO 16000 – 37: 2019 "Indoor air — Part 37: Measurement of PM_{2,5} mass concentration" [10]

1.4 Diossido di azoto (NO₂)

Il diossido di azoto è caratterizzato ad alte concentrazioni da un odore pungente e soffocante.

Negli ambienti *indoor* le sorgenti di NO₂ sono costituite dai fornelli da cucina, dalle stufe, dagli impianti di riscaldamento con caldaie interne e dal fumo di tabacco. Una fonte *outdoor* è rappresentata dal traffico veicolare e dalla presenza di garage o parcheggi coperti dal momento che l'NO₂ è contenuto anche nei gas di scarico degli autoveicoli. Ulteriore fonte sono le emissioni gassose convogliate di impianti civili e industriali.

Per quanto riguarda la salute umana l'NO₂ può causare sia effetti acuti quali l'infiammazione delle mucose e la diminuzione della funzionalità polmonare sia effetti a lungo termine come l'aumento dell'incidenza delle malattie respiratorie, aumento della suscettibilità alle infezioni polmonari batteriche e virali. Il gruppo più vulnerabile della popolazione è costituito dagli asmatici e dai bambini.

Norme tecniche di riferimento per la determinazione in ambienti *indoor*:

- UNI EN ISO 16000-1:2006 "Aria in ambienti confinati - Parte 1: Aspetti generali della strategia di campionamento [7]
- UNI EN ISO 16000-15:2008 "Aria in ambienti confinati - Parte 15: Strategia di campionamento per diossido di azoto (NO₂)" [11]

1.5 Monossido di carbonio (CO)

Il CO è un gas inodore, infiammabile e molto tossico. Può reagire con ossigeno, acetilene, cloro, fluoro, ossidi di azoto. È un inquinante principalmente emesso direttamente da tutti i processi di combustione incompleta dei composti carboniosi. Le sorgenti possono essere di tipo naturale (incendi, vulcani, emissioni da oceani, ecc.) o di tipo antropico (traffico veicolare, riscaldamento, fumo di sigaretta, attività industriali come il trattamento e smaltimento dei rifiuti e le raffinerie di petrolio). Il CO raggiunge facilmente gli alveoli polmonari e quindi il sangue dove compete con l'ossigeno per il legame con l'emoglobina. Il legame che si forma è molto più stabile (circa 250 volte) di quello tra emoglobina ed ossigeno e la carbossemoglobina formata riduce notevolmente la capacità del sangue di portare ossigeno ai tessuti. Gli effetti sulla salute sono essenzialmente riconducibili ai danni causati dall'ipossia a carico del sistema nervoso, cardiovascolare e muscolare. I sintomi che si presentano sono ad esempio la diminuzione della capacità di concentrazione, l'alterazione del comportamento, confusione mentale, accelerazione del battito cardiaco,



vasodilatazione. I gruppi più vulnerabili della popolazione sono le donne in stato di gravidanza e gli individui che soffrono di anemia e di malattie cardiache e polmonari.

Norma tecnica di riferimento per la determinazione:

UNI EN 14626:2012 "Qualità dell'aria ambiente - Metodo normalizzato per la misurazione della concentrazione di monossido di carbonio mediante spettroscopia a raggi infrarossi non dispersiva" [12]

1.6 Composti Organici Volatili Non Metanici Totali (TCOVNM)

La classe dei Composti Organici Volatili Non Metanici comprende diverse sostanze che presentano un'elevata volatilità. Un composto organico volatile è un qualsiasi composto organico che, ad una temperatura di 293,15 K, ovvero 20°C, abbia una pressione di vapore di 0,01 kPa, o superiore, oppure che abbia la corrispondente volatilità in condizioni particolari di uso. Sono inquinanti gassosi che possono provenire sia dall'esterno (es. traffico veicolare, emissioni civili e industriali) sia da fonti interne (es. i materiali costituenti l'arredo, i prodotti di uso quotidiano, il fumo di sigaretta e la cottura dei cibi). Esempi di COV sono i terpeni, la formaldeide, gli alcoli, i BTEX (Benzene, Toluene, Etilbenzene e Xileni).

La determinazione dei singoli composti prevede l'utilizzo di tecniche e strumentazioni costose che richiedono alti livelli di specializzazione; pertanto si preferisce utilizzare tecniche più accessibili che permettano la determinazione della somma di tutti i composti.

Norma tecnica di riferimento per la determinazione in ambienti indoor:

UNI EN ISO 16000-1:2006 "Aria in ambienti confinati - Parte 1: Aspetti generali della strategia di campionamento" [7]

2. Modalità di esecuzione della procedura di monitoraggio

Per garantire un'efficace attività di monitoraggio è necessario effettuare un ricambio dell'aria degli ambienti prima di procedere al rilevamento degli inquinanti al fine di allontanare le sostanze che si sono già accumulate. Risulta importante valutare il tipo di ventilazione di cui è dotato l'ambiente considerato.

Nel caso in cui la ventilazione sia di tipo naturale si raccomanda di effettuare, prima di iniziare le attività di monitoraggio, una ventilazione completa per almeno 15 minuti, tenendo aperte porte e finestre riducendo al minimo qualsiasi attività e la presenza umana. Dopo tale periodo di tempo le porte e le finestre dovranno essere richiuse per circa otto ore (preferibilmente per un'intera notte) e solo successivamente si potrà dare inizio ai campionamenti e alle misurazioni, tenendo le porte e le finestre della stanza chiuse (questo rappresenta il dato del bianco).

Se invece gli ambienti sono dotati di sistemi di Ventilazione Meccanica Controllata o di impianti climatizzazione o di condizionamento (es. pompe di calore, split, ventilatori) questi sistemi saranno mantenuti accesi secondo l'operatività abituale per almeno tre ore prima di operare in assenza di



qualsiasi attività o presenza umana e solo successivamente si potrà dare inizio al campionamento (questo rappresenta il dato del bianco). La misura andrà poi ripetuta, con le stesse modalità, durante l'utilizzo ordinario dell'area con la presenza delle persone che abitualmente frequentano quel determinato ambiente.

Per evitare interferenze sulle misure i campionamenti dovranno avvenire:

- ad una distanza di almeno 0,5 m da angoli o finestre;
- ad una distanza di almeno 0,5 m da pareti, partizioni e altre superfici verticali;
- ad una distanza di almeno 1 m da fonti localizzate come fotocopiatrici, stampanti, fumatori di sigarette, ecc.;
- non direttamente di fronte a diffusori di alimentazione dell'aria, unità di induzione, ventole o riscaldatori o l'esperto dell'operatore;

Nel caso sia presente un sistema di abbattimento bisogna considerare parametri quali il volume d'aria trattato dal sistema per unità di tempo e le sue performance, il volume dell'ambiente trattato e le modalità di riciclo (ad esempio se è previsto il prelievo dell'aria esterna o il riciclo dell'aria nell'ambiente considerato).

Al fine di valutare l'impatto dell'aria esterna sui livelli di concentrazione degli inquinanti descritti nei precedenti paragrafi è necessario campionare in un punto prossimo all'esterno (es. nei pressi di una finestra aperta). Infatti, la conoscenza delle concentrazioni *outdoor* degli inquinanti di interesse permette di pesare e stimare la situazione di inquinamento all'interno nel contesto locale delle aree studiate.

I punti di campionamento da considerare sono legati in prima istanza alle dimensioni della struttura monitorata. La Tabella 2 riporta i punti di campionamento minimi suggeriti in funzione della superficie; ciononostante nel caso in cui la struttura sia costituita da più locali, diversi per tipologia di utilizzo, di arredo/attrezzature o di frequentazione, sarà necessario monitorare almeno uno dei locali più rappresentativi per ognuna delle varie tipologie presenti.

Tabella 2 – Numero dei punti di campionamento in funzione della superficie

Numero di punti di campionamento in funzione della superficie (m²)	
m ²	Punti di campionamento
< 3000	1 per 500 m ²
3000 < 5000	8
5000 < 10000	12
10000 < 15000	15
15000 < 20000	18
20000 < 30000	21
≥ 30000	1 per 1200 m ²



2.1 Caso specifico: modalità di esecuzione della procedura di monitoraggio della qualità dell'aria interna tramite il sistema realizzato nell'ambito del progetto GrIN-BOX

Nel caso in cui venga utilizzato il sistema di monitoraggio realizzato nell'ambito del progetto GrIN-BOX le azioni da eseguire prima di procedere alla misurazione riportate nel paragrafo precedente restano valide.

Per quanto riguarda la procedura di misurazione si raccomanda di effettuare misure della durata di mezz'ora o 1h su 4 fasce orarie nell'arco della giornata, tenendo conto del tempo di stabilizzazione dello strumento che è di circa 10 minuti. Misurazioni di durata inferiore ai 30 minuti non sono raccomandate. Le misure dovranno essere uniformemente distribuite su tutto l'orario di lavoro per gli uffici o coprire gli scenari peggiori nei luoghi pubblici (es. periodi di massimo affollamento e/o ambienti particolarmente a rischio).

È importante assicurare un'adeguata manutenzione del sistema in modo da garantirne un corretto funzionamento. I sensori integrati nel sistema devono essere calibrati ed eventualmente sostituiti; ad esempio i sensori dei gas e dei vapori devono essere cambiati mediamente ogni 6 mesi -1 anno.

3. Migliori tecnologie disponibili per il controllo dei contaminanti

Sebbene il miglior sistema per diminuire l'inquinamento *indoor* sia l'abbattimento/eliminazione delle sorgenti di inquinanti, è possibile utilizzare sistemi di mitigazione degli inquinanti costituiti da dispositivi centralizzati (spesso abbinati ai sistemi di condizionamento) o sistemi portatili. I sistemi di abbattimento sono progettati per rimuovere inquinanti gassosi e particelle dannose dall'aria all'interno degli edifici. Questi sistemi funzionano attraverso una serie di principi che possono variare a seconda del tipo di tecnologia utilizzata. Tuttavia, ci sono alcuni principi di base comuni che sono utilizzati in molti sistemi di abbattimento degli inquinanti *indoor*.

Il primo principio di base è la filtrazione dell'aria. Questo processo coinvolge l'utilizzo di filtri per rimuovere le particelle e gli inquinanti dall'aria, trattenendoli all'interno del filtro stesso. I filtri possono essere costituiti da materiali diversi, come tessuti, carta e fibre di vetro a seconda del tipo di inquinante che si vuole rimuovere.

Il secondo principio di base è l'ossidazione catalitica. Questo processo coinvolge l'utilizzo di catalizzatori per convertire gli inquinanti in sostanze meno dannose. L'ossidazione catalitica è utilizzata per rimuovere gas come il monossido di carbonio, gli ossidi di azoto e i Composti Organici Volatili.

Il terzo principio di base è la ionizzazione. Questo processo coinvolge l'utilizzo di ionizzatori per caricare le particelle presenti nell'aria, rendendole più facili da rimuovere. La ionizzazione è particolarmente utile per rimuovere particelle molto piccole come batteri, virus e fumo di sigaretta.

Il quarto principio di base è la ventilazione forzata. Questo processo coinvolge l'utilizzo di ventilatori per aumentare il flusso d'aria all'interno dell'edificio, espellendo gli inquinanti all'esterno dell'edificio stesso. La ventilazione forzata è particolarmente utile in aree dove le concentrazioni degli inquinanti *indoor* sono molto elevate, come ad esempio nelle cucine o nei laboratori.



Il quinto principio di base è l'assorbimento chimico. Questo processo coinvolge l'utilizzo di sostanze chimiche per assorbire gli inquinanti presenti nell'aria, rimuovendoli dall'atmosfera dell'edificio. L'assorbimento chimico è particolarmente utile per rimuovere gas come la formaldeide e il benzene. In generale, i sistemi di abbattimento degli inquinanti *indoor* utilizzano una combinazione di questi principi di base per rimuovere gli inquinanti. La scelta del metodo di abbattimento più appropriato dipende dal tipo di inquinante che si vuole rimuovere, dalle dimensioni dell'edificio e dalle condizioni ambientali dell'area circostante.

Nell'ambito del progetto GRIN-BOX è stato messo a punto un sistema di abbattimento che prevede l'utilizzo di un filtro HEPA (*High-Efficiency Particulate Air*) abbinato a un filtro a carboni attivi per l'adsorbimento dei COV.

4. Definizione del livello della qualità dell'aria interna

Per la valutazione della conformità agli obiettivi di qualità dell'aria *indoor* nella Tabella 3 viene proposto, per ciascun parametro considerato, un valore guida elaborato sulla base di quanto stabilito o raccomandato da alcuni Paesi europei ed extraeuropei e di quanto indicato dall'OMS (Appendici A, B, C, D ed E).

L'arco di 8 h si riferisce alla giornata lavorativa mentre il riferimento alle 24 h è rappresentativo degli ambienti di tipo residenziale.

Tabella 3 – Valori guida proposti per la valutazione della conformità agli obiettivi di qualità dell'aria *indoor*

Parametro	Valore guida
CO ₂	< 1000 ppm = livello di qualità dell'aria interna buono < 1200 ppm = livello di qualità dell'aria interna sufficiente
PM _{2,5}	25 µg/m ³ (8h)
PM ₁₀	50 µg/m ³ (8h)
NO ₂	200 µg/m ³ (1h) 40 µg/m ³ (8 h)
CO	100 (15 min) 35 (1h) 10 (8h) 4 (24h)
TVOCNM	300 µg/m ³ (8h)

L'aria interna potrà considerarsi conforme agli obiettivi di qualità se in almeno l'80% dei punti di campionamento/determinazione i valori medi di concentrazione degli inquinanti considerati rientrano nei valori di riferimento e, nei casi di superamento, nessuno degli inquinanti supera il suo valore di riferimento di più del 50%.



Per i parametri fisici umidità relativa e temperatura i valori misurati non dovranno deviare più del 10% dai valori minimi e massimi degli intervalli di riferimento definiti (vedi Tabella 1).

Nel caso in cui non venga utilizzato il sistema di monitoraggio e abbattimento realizzato nell'ambito del progetto GrIN – BOX e in assenza di modifiche sostanziali degli ambienti o delle attività svolte, si raccomanda di ripetere l'intero set di misure ogni 5 anni mentre è consigliabile ripetere annualmente le misure di CO₂ e PM, in modo da assicurare la conformità agli obiettivi di qualità dell'aria interna.



Appendice A - Esempi di valori limite stabiliti a livello normativo o raccomandati per la CO₂ indoor

CO₂ - Valori limite stabiliti a livello normativo o raccomandati (ppm)

Belgio [13]	Brasile [14]	Canada [15]	EN 16798-1: 2019 [16]	Finlandia [17]	Giappone [14]	Germania [18]	Hong Kong [19] [20]	Paesi Bassi [21]	Portogallo [14]	Regno Unito [14]	Repubblica di Corea [14]	Singapore [14]	Stati Uniti [14]	Taiwan [14]
<p>livello A = concentrazione inferiore a 900 ppm</p> <p>livello B = concentrazione inferiore a 1200 ppm</p>	1000	1000 (24 h)	valore di 1200 considerato come riferimento per una buona qualità dell'aria negli edifici scolastici	Il valore di concentrazione istantanea di anidride carbonica nell'aria interna deve superare quella esterna al massimo di 800 ppm	1000 scuole 1500 concentrazione media nella giornata scolastica	<p>< 1000 concentrazione sicura</p> <p>1000-2000 concentrazione che merita attenzione</p> <p>> 2000 concentrazione inaccettabile</p>	<p>Eccellente < 800 (8h)</p> <p>Buona < 1000 (8h)</p>	800-1200	1000 1250	600 scuole: 1500 concentrazione media nella giornata scolastica	1000	1000	1000 Secondo lo standard ASHRAE 62/2001 il valore limite per l'accettabilità della qualità dell'aria indoor è stabilito pari a una differenza tra concentrazione interna ed esterna di 700 ppm e corrisponde a condizioni di ventilazione ritenute disagiabili da circa il 20% delle persone presenti	1000



Appendice B - Esempi di valori limite stabiliti a livello normativo o raccomandati per il particolato atmosferico – PM_{2,5} e PM₁₀ indoor

PM _{2,5} e PM ₁₀ - Valori limite stabiliti a livello normativo o raccomandati (µg/m ³)										
Inquinante	Belgio Regione fiamminga [22]	Finlandia [22] [23]	Francia [24]	Germania [18]	Hong Kong [19] [20]	Norvegia [22]	OMS [25]	Paesi Bassi [21]	Polonia edifici residenziali [22]	Portogallo [22]
PM ₁₀	≤ 40 (24 h)	50	nessun limite proposto	raccomandano di fare riferimento ai valori dell'OMS del 2021	Eccellente < 20 (8h) Buona < 180 (8h)	90 (8h)	45 (24 h) 15 (1 anno)	50 (24 h) 20 (1 anno)	90 (8h)	50 (8h)
PM _{2,5}	≤ 15 (1 anno)	< 10	nessun limite proposto	raccomandano di fare riferimento ai valori dell'OMS del 2021		40 (8h)	15 (24h) 5 (1 anno)	25 (24 h) 10 (1 anno)	40 (8h)	25 (8h)



Appendice C - Esempi di valori limite stabiliti a livello normativo o raccomandati per il diossido di azoto (NO₂) indoor

NO ₂ - Valori limite stabiliti a livello normativo o raccomandati (µg/m ³)							
Belgio Regione fiamminga [22]	Canada [26]	Francia [27]	Germania [18]	Hong Kong [19] [20]	Norvegia [22]	OMS [25]	Paesi Bassi [21]
135 (1h) VI Valore intervento: 200 (1h)	20 (24 h) 170 (1h)	200 (1h) 20 (1 anno)	250 (1h) RWII = concentrazione il cui superamento richiede un intervento immediato 80 (1h) RWI = concentrazione al di sotto della quale, allo stato attuale delle conoscenze, non si aspettano effetti avversi sulla salute umana	Eccellente < 40 (8h) Buona < 150 (8h)	200 (1h) 100 (24 h)	25 (24 h) 10 (1 anno)	200 (1 h) 40 (1 anno)



Appendice D - Esempi di valori limite stabiliti a livello normativo o raccomandati per il monossido di carbonio (CO) indoor

CO - Valori limite stabiliti a livello normativo o raccomandati (mg/m ³)											
Belgio Regione fiamminga [22]	Canada [28]	Finlandia [22]	Francia [29]	Germania [18]	Hong Kong [19] [20]	Norvegia [22]	OMS [25]	Paesi Bassi [21]	Polonia edifici pubblici [22]	Polonia edifici residenziali [22]	Regno Unito [22]
5,7 (24 h) VI = Valore di intervento 30 (1h)	11,5 (24h) 28,6 (1h)	8	100 (15 min) 60 (30 min) 30 (1h) 10 (8h)	Fanno riferimento ai valori dell'OMS del 2021 100 (15 min) 35 (1h) 10 (8h) 4 (24h)	Eccellente < 2 (8h) Buona < 10 (8h)	25 (1h) 10 (8h)	100 (15 min) 35 (1h) 10 (8h) 4 (24h)	100 (15 min) 60 (30 min) 30 (1h) 10 (8h)	10 (8h)	25 (1h)	100 (15 min) 60 (30 min) 30 (1h) 10 (8h)



Appendice E - Esempi di valori limite stabiliti a livello normativo o raccomandati per i Composti Organici Volatili totali (TVOC) indoor

COV totali - Valori limite stabiliti a livello normativo o raccomandati ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)					
Germania [18]	Hong Kong [19] [20]	Norvegia [22]	Paesi Bassi [21]	Polonia edifici residenziali [22]	Portogallo [22]
< 300 concentrazione sicura					
300-1000 concentrazione sicura se i valori guida <i>indoor</i> non sono superati per singole sostanze o gruppi di sostanze	Eccellente < 200 (8h)	400	200 (1 anno)	400	600 (8h)
1000-3000 concentrazione che richiede attenzione	Buona < 600 (8h)				
3000-10000 concentrazione che desta allarme					
> 10000 concentrazione inaccettabile					



Bibliografia

- [1] Commissione europea - COM (2021) 400 final. *Comunicazione della Commissione al Parlamento europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale europeo e al Comitato delle Regioni. Un percorso verso un pianeta più sano per tutti. Piano d'azione dell'UE: "Verso l'inquinamento zero per l'aria, l'acqua e il suolo"*, 2021.
- [2] Prassi di riferimento UNI/PdR 122:2022 - *Monitoraggio della qualità dell'aria negli edifici scolastici-Strumenti, strategie di campionamento e interpretazione delle misure*, 2022.
- [3] Ministero del Lavoro, della Salute e delle Politiche Sociali. *Decreto 10 ottobre 2008- Disposizioni atte a regolamentare l'emissione di aldeide formica da pannelli a base di legno e manufatti con essi realizzati in ambienti di vita e soggiorno*, 2008.
- [4] Ministero della Transizione Ecologica. *Decreto 23 giugno 2022- Criteri Ambientali Minimi per l'affidamento del servizio di progettazione di interventi edilizi, per l'affidamento dei lavori per interventi edilizi e per l'affidamento congiunto di progettazione e lavori per interventi edilizi*, 2022.
- [5] Ministero della Salute. https://www.salute.gov.it/portale/temi/p2_6.jsp?id=4387&area=indor&menu=vuoto (ultimo accesso il 31 maggio 2023).
- [6] Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA). *Inquinamento indoor: aspetti generali e casi studio in Italia*, 2010.
- [7] UNI EN ISO 16000-1: 2006 *"Aria in ambienti confinati - Parte 1: Aspetti generali della strategia di campionamento"*, 2006.
- [8] UNI EN ISO 16000-26: 2012 *"Aria in ambienti confinati - Parte 26: Strategia di campionamento per l'anidride carbonica (CO₂)"*, 2012.
- [9] ISO 16000-34: 2018 *"Indoor air — Part 34: Strategies for the measurement of airborne particles"*, 2018.
- [10] ISO 16000 – 37: 2019 *"Indoor air — Part 37: Measurement of PM_{2,5} mass concentration"*, 2019.
- [11] UNI EN ISO 16000-15:2008 *"Aria in ambienti confinati - Parte 15: Strategia di campionamento per diossido di azoto (NO₂)"*, 2008.



- [12] UNI EN 14626:2012 *“Qualità dell'aria ambiente - Metodo normalizzato per la misurazione della concentrazione di monossido di carbonio mediante spettroscopia a raggi infrarossi non dispersiva”*, 2012.
- [13] Royaume de Belgique. Service public federal santé publique, sécurité. *Loi du 6 novembre 2022 relative à l'amélioration de la qualité de l'air intérieur dans les lieux fermés accessibles au public*, 2022.
- [14] Rapporti Istisan 16/15. Istituto Superiore di Sanità. *Presenza di CO₂ e H₂S in ambienti indoor: attuali conoscenze e letteratura scientifica*, 2015.
- [15] Government of Canada. *Residential Air Quality Guidelines “Carbon dioxide”*, 2021.
- [16] UNI EN 16798-1:2019 *“Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 1: Parametri di ingresso dell'ambiente interno per la progettazione e la valutazione della prestazione energetica degli edifici in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica – Modulo M1-6”*, 2019.
- [17] *Finnish Decree of the Ministry of the Environment on the Indoor Climate and Ventilation of New Buildings 1009/2017*, 2017.
- [18] German Committee on Indoor Air Guide Values. Umweltbundesamt <https://www.umweltbundesamt.de/en/topics/health/commissions-working-groups/german-committee-on-indoor-air-guide-values#german-committee-on-indoor-air-guide-values-air> (ultimo accesso il 31 maggio 2023).
- [19] Burnett J. *Indoor Air Quality Certification Scheme for Hong Kong Buildings. Indoor and Built Environment*. 14(3-4):201-208. <https://doi.org/10.1177/1420326X05053788>, 2005.
- [20] Anderson A., Cheung A., Lei M. *Evaluation of Hong Kong's indoor air quality management programme: Certification scheme, objectives, and technology*. Bachelor of Sci. Proj. Rep., Polytechnic Institute, Worcester, 2014.



- [21] RIVM – National Institute for Public Health and the Environment. *Health-based guidelines values for the indoor environment*. RIVM report 609021044/2007, 2007.
- [22] Rapporti ISTISAN 20/3 Istituto Superiore di Sanità. *Qualità dell'aria indoor negli ambienti scolastici: strategie di monitoraggio degli inquinanti chimici e biologici*, 2020.
- [23] Ahola M., Säteri J., & Sariola L. *Revised Finnish classification of indoor climate 2018*. In E3S Web of Conferences (Vol. 111, p. 02017). EDP Sciences, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911102017>, 2019.
- [24] Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail (ANSES). *ANSES's List of Indoor Air Quality Guidelines Values*. https://www.anses.fr/fr/system/files/Tableau_VGAI_Juillet2018EN.pdf, 2018 (ultimo accesso il 31 maggio 2023).
- [25] World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO, 2021.
- [26] Government of Canada. *Residential Air Quality Guidelines "Nitrogen dioxide"*, 2015.
- [27] Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail (ANSES). *Proposition de valeurs guides de qualité d'air intérieur - Le dioxyde d'azote*. <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2011sa0021Ra.pdf>, 2013 (ultimo accesso il 31 maggio 2023).
- [28] Government of Canada. *Residential Air Quality Guidelines "Carbon monoxide"*, 2010.
- [29] Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail (ANSES). *Valeurs guides de qualité d'air intérieur- Le monoxyde de carbone*. <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2004etVG003Ra.pdf>, 2007 (ultimo accesso il 31 maggio 2023).