

D. SURIANO, M. PRATO, V. PFISTER, M. PENZA

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

DISPOSITIVO MULTISENSORIALE "AIRBOX" PER LA QUALITÀ DELL'ARIA

Dalla progettazione alla messa in esercizio

RT/2016/24/ENEA



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

D. SURIANO, M. PRATO, V. PFISTER, M. PENZA

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

DISPOSITIVO MULTISENSORIALE "AIRBOX" PER LA QUALITÀ DELL'ARIA

Dalla progettazione alla messa in esercizio

RT/2016/24/ENEA



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

I rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina <http://www.enea.it/it/produzione-scientifica/rapporti-tecnici>

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

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

DISPOSITIVO MULTISENSORIALE "AIRBOX" PER LA QUALITÀ DELL'ARIA

Dalla progettazione alla messa in esercizio

D. Suriano, M. Prato, V. Pfister, M. Penza

Riassunto

Scopo di questo documento è la descrizione delle attività che hanno portato alla progettazione e realizzazione di un dispositivo per il rilevamento di inquinanti atmosferici gassosi, polveri sottili, e parametri ambientali, utili a definire il grado di qualità dell'aria in ambienti "indoor/outdoor". Interamente progettato e realizzato all'interno del Laboratorio Test Sensori del Centro Ricerche ENEA di Brindisi, il dispositivo ha come punti di forza la versatilità nel poter essere allestito con sensori di tipologia differente senza alcuna modifica sulla parte hardware del dispositivo, la semplicità di installazione e messa in esercizio, contenuti consumi energetici, alto grado di portatilità, capacità di acquisire autonomamente in locale dati di misura georeferenziati e, al tempo stesso, di trasmetterli in remoto per un pronto utilizzo in tempo reale per il supporto alle decisioni. Il dispositivo è stato replicato in più unità che hanno consentito la messa in campo di una rete di nodi di misura di inquinanti atmosferici, con collocazione su strutture fisse e mezzi mobili, ed ha trovato una pronta e fattiva applicazione in contesto smart cities nell'ambito del Progetto RES-NOVAE a partire da luglio 2015.

Parole chiave: Sistema di sensori, misure specie gassose, misure parametri ambientali, geo-referenziazione, indice qualità dell'aria, inquinamento atmosferico, monitoraggi ambientali e microclimatici.

Abstract

Aim of this document is to describe the experimental activities and measurements by means of a designed and fabricated multi-parametric sensor-device to monitor air pollution (e.g., gases and particulate matter) including environmental parameters (e.g., temperature, relative humidity, CO₂). The sensor-system has been completely designed and implemented in the Sensor Test Lab of the ENEA Research Center in Brindisi. Its main features are: i) capability to be equipped with various types of environmental sensors without any modification of hardware parts, ii) simple installation procedures with standard interface, iii) low power consumption, iv) high portability level, v) capability to get and store locally digital geographic information data and finally vi) to transmit data in real time towards central server. We have fabricated more items of this environmental sensor-system deployed on field to create a sensor network for urban monitoring of air pollutants thanks to Italian National Project RES-NOVAE in smart cities context.

Keywords: Sensor system , gas concentration measurement, environmental parameters, digital geographic information, air quality index, air pollution, air quality monitoring.

INDICE

Introduzione	7
1. Problematiche delle tecnologie per il monitoraggio ambientale e definizione delle specifiche dell’Airbox	8
2. Airbox per l'acquisizione dati di qualità dell'aria.	8
2.1 Scheda di interfacciamento sensori	9
2.1.1 Specifiche hardware	9
2.1.2 Caratteristiche hardware	9
2.1.3 Software di gestione del microprocessore	11
2.2 Sensori e schede sensori	11
2.3 Architettura dell’Airbox	13
2.3.1 Software di gestione dell’Airbox	15
3. Gestione dei dati sul server dedicato	18
3.1 Definizione del periodo di riferimento per la sintesi dei dati e criteri di validazione	18
3.2 Strutture dei file dati di output e sequenza di scrittura delle misure	19
3.3 I programmi di elaborazione dei dati di misura	21
4. Statistiche sul funzionamento dei nodi, sulla elaborazione, produzione e sintesi dei dati	22
5. Discussione	22
6. Conclusioni	25
Ringraziamenti	25
Appendice	26
A. Presentazione di un Airbox e del suo esercizio	26
A.1 Operazione di taratura della scheda sensori elettrochimici	27
A.2 Dati sintetizzati dal posizionamento (luglio 2015) a tutto aprile 2016	29
Bibliografia	37

Introduzione

Scopo di questo documento è la descrizione delle attività che hanno portato alla progettazione e realizzazione di un dispositivo per il rilevamento di inquinanti atmosferici gassosi, polveri sottili, e parametri ambientali, utili a definire il grado di qualità dell'aria in ambienti "indoor/outdoor".

Interamente progettato e realizzato all'interno del Laboratorio Test Sensori del Centro Ricerche ENEA di Brindisi, il dispositivo ha come punti di forza la versatilità nel poter essere allestito con sensori di tipologia differente senza alcuna modifica sulla parte hardware del dispositivo, la semplicità di installazione e messa in esercizio, i contenuti consumi energetici, l'alto grado di portatilità, la capacità di acquisire autonomamente in locale dati di misura georeferenziati e, al tempo stesso, di trasmetterli in remoto per un pronto utilizzo in tempo reale per il supporto alle decisioni.

Tale dispositivo, che di qui in avanti chiameremo "Airbox", è il frutto di uno sforzo teso ad affiancare le soluzioni tecnologiche prodotte dalle attività dei nostri laboratori all'azione della strumentazione di riferimento normalmente impiegata per questi scopi. Il nostro Laboratorio, così come molti altri soggetti che operano nel settore, ha da tempo indirizzato parte delle attività di ricerca ed innovazione in questa direzione intervenendo su quelle caratteristiche che, a vario titolo, rappresentano i punti deboli per un impiego ad elevata risoluzione spaziale e temporale della strumentazione tradizionale: costi di acquisto, manutenzione ed esercizio elevati, ingombro delle apparecchiature considerevole con susseguente scarso, se non nullo, grado di portatilità, e consumi elettrici non indifferenti [1].

Tutti questi fattori portano ad un allestimento di reti di monitoraggio ambientale con un limitatissimo numero di punti di monitoraggio della qualità dell'aria a scapito di una scarsa risoluzione spaziale e temporale delle relative mappe indicatrici [1-3]. Per contro, la situazione ideale implicherebbe il dispiegamento di un cospicuo numero di dispositivi o nodi di rilevamento, fittamente distribuiti sull'area da monitorare, in modo da garantire un'idonea risoluzione spaziale del grado della qualità dell'aria dei diversi settori componenti lo scenario urbano o extraurbano monitorato [1-6].

Il disporre di un elevato numero di punti di monitoraggio degli inquinanti atmosferici trova una più facile realizzazione quando il dispositivo di rilevamento possiede quelle peculiarità (costo di realizzazione o di acquisto non elevato, costi di manutenzione e tenuta in esercizio molto contenuti, semplicità di installazione, alto grado di portatilità e bassi consumi energetici) che si è voluto far proprie del dispositivo prototipo realizzato nei nostri laboratori [1].

L'Airbox si propone quindi di dare una prima sperimentale risposta con la massima accuratezza possibile alle specifiche dettate dalle esigenze pocanzi esposte.

Il dispositivo è stato replicato in più unità che hanno consentito la messa in campo di una rete di nodi di misura di inquinanti atmosferici, con collocazione su strutture fisse e mezzi mobili, e che hanno offerto una pronta e fattiva applicazione nell'ambito del Progetto RES-NOVAE nella città di Bari.

1 Problematiche delle tecnologie per il monitoraggio ambientale e definizione delle specifiche dell’Airbox

Il Laboratorio Test Sensori del Centro Ricerche ENEA di Brindisi ha avviato da diverso tempo un filone di attività tese allo sviluppo e sperimentazione di sistemi che dessero una prima idonea risposta alle problematiche del monitoraggio ambientale. L’esperienza accumulata in questo ambito ha portato alla definizione delle peculiarità e specifiche tecniche del dispositivo da realizzare. Frutto in parte, ma non solo, delle considerazioni prima menzionate, questi requisiti sono schematizzabili nei seguenti punti:

- costi di realizzazione contenuti;
- costi di manutenzione e tenuta in esercizio molto bassi;
- ridotto consumo di energia elettrica;
- facilità e semplicità nelle operazioni di installazione;
- dimensioni dell’apparecchiatura contenute e, conseguentemente, alto grado di portatilità ;
- estrema versatilità, intesa come semplicità delle operazioni necessarie al cambio del “set” di sensori, qualora sorgesse l’esigenza di monitorare tipi diversi di parametri ambientali;
- archiviazione in locale un consistente numero di dati di misura dei sensori;
- controllo remoto e trasmissione in remoto dei dati.

A tutte queste fondamentali caratteristiche va aggiunto un ulteriore requisito che, sebbene di minore importanza per un’utenza non esperta o comunque priva di competenze tecniche specifiche, risulta essere strategica per le attività del Laboratorio: la possibilità di avere un accesso totale e completo al software che controlla l’intero sistema. Tale peculiarità assume primaria importanza nel momento in cui si rende necessario integrare il nodo monitorante con altri sistemi sviluppati o forniti da terze parti.

Il quadro sin qui delineato ha spinto ad effettuare una prima attività di ricerca per verificare l’esistenza in commercio di apparecchiature o sistemi in grado di soddisfare appieno le esigenze schematizzate nei punti e nelle considerazioni pocanzi esposte. Sebbene diverse apparecchiature in commercio si proponessero di rispondere a tali esigenze nessuna presentava la versatilità ricercata. Per tale motivo si è deciso di intraprendere il più lungo ed impegnativo cammino della progettazione ingegneristica dell’Airbox (nonché di parte dei componenti) e della sua realizzazione. Percorrere questa strada ha consentito di perseguire uno degli obiettivi inizialmente stabiliti che prevede l’implementazione, tramite tecnologie “low cost”, di sistemi in grado di fornire dati sull’indice della qualità dell’aria da affiancare alle strumentazioni analitiche tradizionalmente utilizzate per tale finalità.

2 Airbox per l’acquisizione dati di qualità dell’aria.

L’Airbox è un sistema di misura ed acquisizione dati ambientali composto da un insieme di sensori di misura di gas, particolato, temperatura e umidità relativa, collegati ad una scheda centrale. La scheda centrale gestisce l’acquisizione dei segnali dai sensori, ne archivia le misure in locale e le invia, qualora richiesto, ad un server remoto.

Si è scelto di progettare parte della componentistica elettronica per usufruire di una maggiore versatilità nell’integrazione di sensori di diversa produzione e caratteristiche elettriche non omogenee.

Nei paragrafi che seguono saranno descritte le schede progettate internamente al Laboratorio e successivamente verrà presentato l’Airbox nella sua interezza facendo riferimento ad una

configurazione di sensori utilizzata per una campagna di lunga durata (superiore ai 9 mesi continuativi).

In un capitolo successivo saranno descritte le procedure automatiche lato server per un primo trattamento dati.

2.1 Scheda di interfacciamento sensori

2.1.1 Specifiche hardware

La scheda di interfacciamento tra il sistema di sensori e la scheda centrale dell'apparecchio Airbox, è stata progettata "ad hoc" nei Laboratori del Centro Ricerche ENEA di Brindisi. Tale soluzione è scaturita dalla constatazione che sul mercato non si è riscontrata l'esistenza di schede elettroniche che soddisfacessero in modo completo le caratteristiche e le funzionalità necessarie, schematizzabili nei seguenti punti:

- dimensioni della scheda elettronica il più possibile contenute, utili per un utilizzo molto flessibile della stessa;
- consumi energetici ridotti al minimo indispensabile, aspetto che comporta la presenza sulla scheda della sola elettronica strettamente necessaria all'economia dell'intero sistema (tale elemento è stato il principale motivo per cui non si è considerato l'impiego di schede per impieghi generali comunemente presenti sul mercato);
- presenza a bordo scheda di sensori di temperatura e umidità: due parametri che costantemente caratterizzano tutte le esperienze insite nelle attività di monitoraggio ambientale;
- presenza sulla scheda di elettronica con cui si possa gestire l'alimentazione della scheda tramite interfaccia USB, tramite batterie al Litio ed in grado di provvedere alla ricarica di eventuali batterie;
- presenza sulla scheda di elettronica con cui sia possibile amplificare e prefiltrare segnali analogici provenienti da sensori con tale tipo di segnali in uscita;
- possibilità di interfacciarsi tramite canali USB;
- presenza sulla scheda di "socket" su cui connettere adattatori Bluetooth per future sperimentazioni già programmate in ambito di consapevolezza ambientale dei cittadini con utilizzo di smartphone e relative app.

Tale insieme di specifiche è stato dettato in parte da esigenze legate alla realizzazione dell'attuale apparecchiatura, in parte per poter usufruire di una maggiore versatilità in previsione di utilizzi futuri. Tutto questo ha fatto propendere per una progettazione e realizzazione in proprio della scheda elettronica, piuttosto che per l'acquisto di un prodotto già pronto all'uso ma meno versatile.

2.1.2 Caratteristiche hardware

La scheda di interfacciamento sensori è stata realizzata con componentistica elettronica discreta a tecnologia SMD al fine di conferire alla circuiteria elettronica il più alto grado di miniaturizzazione. La scheda fisicamente si presenta come mostrato in Figura 1 e Figura 2 mentre le principali caratteristiche sono sinteticamente riportate in Tabella 1.

Compito principale della scheda è quello di prelevare i segnali provenienti dai sensori, amplificarli laddove opportuno, effettuare un primo filtraggio del segnale (per eliminarne l'eventuale rumore elettronico in eccesso), elaborarlo numericamente e costruire i dati relativi al segnale stesso da inviare tramite il canale USB all'unità (scheda centrale, par. 2.3) pronta a riceverli.

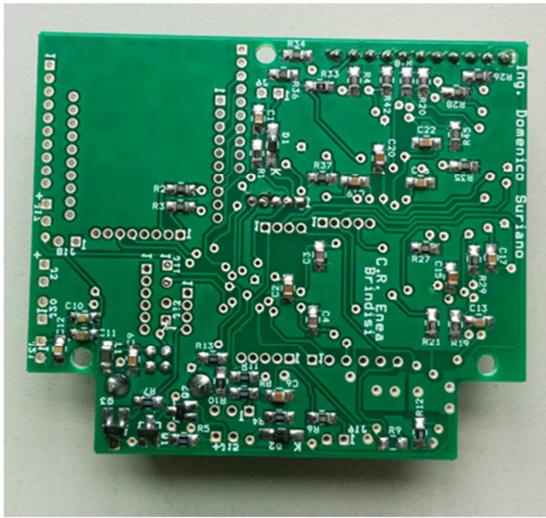


Figura 1. Scheda di interfacciamento sensori (lato A). **Figura 2.** Scheda di interfacciamento sensori (lato B).

Parametri	Valore
Dimensioni:	7.4 cm x 6.1 cm
Peso:	28 gr.
Consumo elettrico massimo (dipendente dalla modalità di funzionamento e dal set di sensori utilizzato):	0.05 W
Tipologia di segnali in ingresso:	8 analogici, 1 bus SPI
Alimentazione:	3.5Vcc – 5Vcc
Interfacce in uscita:	USB tipo B, Bluetooth

Tabella 1. Caratteristiche della scheda di interfacciamento sensori.

La scheda di interfacciamento sensori ha la grande peculiarità di poter trattare in ingresso segnali provenienti sia da sensori con uscita di tipo analogico che da sensori con uscita di tipo digitale. Nel primo caso il numero massimo di segnali che contemporaneamente si possono applicare in ingresso alla scheda è 8 mentre una porta di tipo SPI è resa disponibile qualora si debbano collegare sensori con uscita di tipo digitale. È possibile inoltre selezionare il livello di amplificazione di ogni singolo segnale in ingresso di tipo analogico grazie all'insieme di quattro amplificatori operazionali bicanale del tipo AD8609 della Analog Devices. La frequenza del segnale analogico in ingresso non può eccedere i 300 kHz, limite che è più che sufficiente per la tipologia di sistemi sensoristici impiegati tipicamente nell'ambito delle attività programmate e prevedibili: le variazioni dei segnali che usualmente provengono dai sensori sono infatti assimilabili alla frequenza della corrente continua.

Il cuore della scheda è rappresentato dal microprocessore PIC18F4685 della Microchip che traduce in dato numerico i segnali dei sensori, pretrattati o meno (a seconda se di tipo analogico o digitale). I dati elaborati nel microprocessore possono essere inviati, tramite il blocco elettronico addetto alle comunicazioni, o sul canale USB (interfaccia verso altri apparati) o sul canale Bluetooth. Un terzo blocco, di alimentazione, presente sulla scheda preleva dalla presa USB la potenza elettrica e la eroga ad una tensione di 3.3V in modo da poter opportunamente alimentare sia l'elettronica della scheda stessa che quelle delle schede sensori ad essa connesse.

2.1.3 Software di gestione del microprocessore

La componentistica elettronica così progettata consente un corretto funzionamento della scheda di interfacciamento sensori grazie al software presente nella memoria del microprocessore cuore del dispositivo. Esso è stato realizzato in linguaggio C ed è strutturato in un corpo centrale che può essere pensato come una sorta di “macro-routine” che ciclicamente svolge i “task” così schematizzabili:

- conversione dei segnali da analogici a digitali, e/o acquisizione del segnale digitale su porta SPI;
- filtraggio numerico del segnale elettrico convertito per eliminare residui di rumore elettrico;
- applicazione dell’algoritmo matematico di conversione dei segnali elettrici in misurazioni e dati relativi alle specie chimiche o parametri rilevati dai sensori.

A questa “macro-routine” sono affiancate altre due “routine” azionate da meccanismi di “interrupt” che intervengono quando sul canale USB, oppure sul canale Bluetooth, giunga una richiesta di invio dati. Queste due “routine” hanno il compito di fornire il “record” di misurazioni più recente al dispositivo connesso alla scheda, realizzando così una tipica connessione “master”-“slave”, laddove la scheda che stiamo descrivendo rappresenta lo “slave”, mentre una qualsiasi unità connessa tramite il canale USB o Bluetooth si comporta da “master”.

2.2 Sensori e schede sensori

Alla luce delle esperienze maturate in ambito di controllo della qualità dell’aria e delle conoscenze acquisite su tecnologie e caratteristiche dei sensori, si è optato per dotare il prototipo dell’Airbox di elementi sensibili per il monitoraggio degli inquinanti aeriformi e delle specie chimiche gassose NO₂, O₃, CO, SO₂, CO₂, dei composti organici volatili (VOC), delle polveri sottili (PM₁₀), in aggiunta all’omnipresente rilievo di temperatura e umidità.

Per quanto riguarda i primi quattro parametri (NO₂, O₃, CO, SO₂) da monitorare, si è scelto di adottare sensoristica a stato solido con tecnologia di tipo elettrochimico, caratteristica che permette di assicurare un ridotto ingombro. Tale scelta è stata motivata dalla considerazione che tali tipi di sensori, benché più costosi rispetto ad altri similari a stato solido realizzati con diversa tecnologia (ad esempio i chemio-resistivi), offrono migliori prestazioni in termini di bassa sensibilità agli interferenti e di capacità di rilevazione delle basse concentrazioni (da ppm a ppb). A questi due aspetti, di estrema importanza nell’ambito del monitoraggio della qualità dell’aria, si aggiunge poi un consumo elettrico ridotto (soprattutto nel caso dei sensori per NO₂, O₃, CO, SO₂). Per quanto riguarda la misura di CO₂, si è adottato un sensore NDIR operante sul principio dell’assorbimento ottico nel campo della radiazione nell’infrarosso (IR) consentendo una buona accuratezza della misura. Per quanto riguarda invece i VOC, va fatto presente che la tecnologia realizzativa a stato solido adottata basata sul principio PID (Photo Ionisation Detector) è in grado, allo stato corrente, di rilevare unicamente la concentrazione dei VOC totali presenti nell’ambiente mentre non è in grado di discriminare le singole concentrazioni dei diversi tipi di composti organici volatili.

Per quanto riguarda la rilevazione delle polveri sottili, si è optato per l’adottare una sensoristica di tipo ottico: il sensore deputato a tale compito, di dimensioni sufficientemente contenute, rileva le particelle di polvere grazie all’effetto di diffrazione del fascio laser presente al suo interno. La scelta di questa tipologia di sensore per la misura del PM₁₀ è stato un soddisfacente compromesso tra livello di accuratezza della misura e grado di compattezza.

Sulla base di tutte queste considerazioni si è scelto di equipaggiare l’Airbox con il “set” di sensori sintetizzato in Tabella 2. I sensori individuati hanno tutti un segnale in uscita di tipo analogico in

tensione pressoché continua e sono elettricamente connessi alla scheda di interfacciamento sensori di cui ne rappresentano gli ingressi.

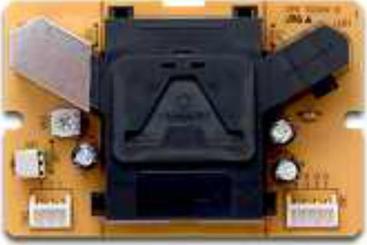
Sensori	Caratteristiche
	<ul style="list-style-type: none"> • Sensore NO₂ (0-2 ppm) (NO2-B4, Alphasense) • Sensore O₃ (0-2 ppm) (O3-B4, Alphasense) • Sensore CO (0-20 ppm) (CO-B4, Alphasense) • Sensore SO₂ (0-2 ppm) (SO2-B4, Alphasense)
	<ul style="list-style-type: none"> • Sensore VOCs totali (0-100 ppm) (PID-A1, Alphasense)
	<ul style="list-style-type: none"> • Sensore PM₁₀ (0-100 ug/m³) (PPD20V, Shinyei)
	<ul style="list-style-type: none"> • Sensore CO₂ (0-5000 ppm) (NDIR, IRC-A1, Alphasense)
	<ul style="list-style-type: none"> • Sensore Temperatura (-40 ÷ +125°C) (TC1047A, Microchip)
	<ul style="list-style-type: none"> • Sensore Umidità Relativa (0 - 90%) (HIH-5030, Honeywell)

Tabella 2. Sensori che equipaggiano l’Airbox.

I sensori per NO₂, O₃, CO, SO₂ individuati, benché contraddistinti da elementi sensibili ovviamente diversi tra loro, hanno tecnologie e funzionamento elettrico tra loro identici. Questo aspetto ha spinto per un’ulteriore miniaturizzazione del dispositivo, uno dei target prefissati, per poter connettere l’intero “set” di sensori ad un’unica scheda elettronica piuttosto che a quattro diverse.

Non avendo trovato sul mercato schede elettroniche idonee a ospitare contemporaneamente i quattro sensori si è proceduto anche in questa occasione alla progettazione ed alla realizzazione in proprio di una scheda elettronica. La scheda così realizzata, chiamata *scheda sensori elettrochimici*

B4 (o, più in breve, *scheda B4*), presenta un elevato grado di compattezza (Figura 3) e risulta di fatto in grado di “raggruppare” i quattro sensori (Figura 4) garantendone il corretto funzionamento elettrico: stanti i consumi elettrici minimi, evidenziati unitamente ad altre caratteristiche in Tabella 3, essa viene alimentata direttamente dalla scheda di interfacciamento sensori cui è connessa.

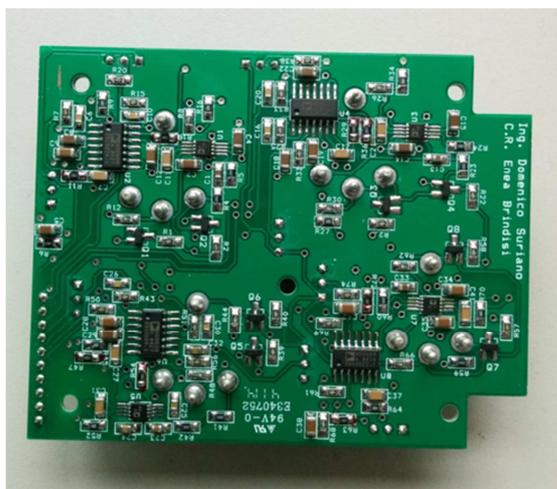


Figura 3. Scheda sensori elettrochimici B4 (Lato A).

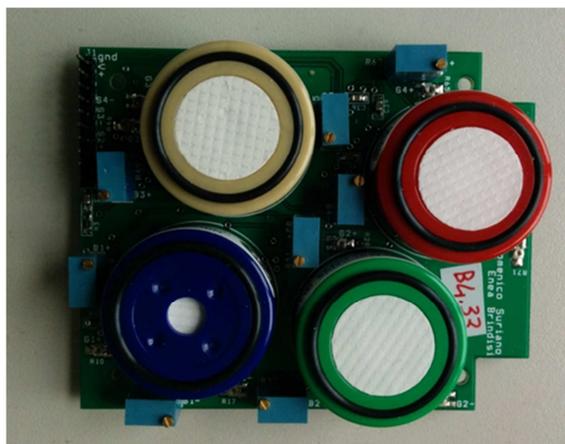


Figura 4. Scheda sensori elettrochimici B4 (Lato B) equipaggiata con sensori.

Parametri	Valori
Dimensioni	9.2 cm × 7.4 cm
Peso	75 g
Numero massimo di sensori	4
Consumo elettrico	< 10 mW
Alimentazione	3.5 Vcc – 5 Vcc
Tipologia segnali in uscita	analogici

Tabella 3. Caratteristiche della scheda sensori elettrochimici B4.

La scheda sensori elettrochimici B4 è di fatto composta da un sistema di amplificatori operazionali a basso rumore che costituiscono sia i circuiti potenziostatici di cui gli elettrodi di riferimento dei sensori elettrochimici hanno bisogno, sia i canali di amplificazione che provvedono ad amplificare le debolissime correnti (dell’ordine di alcuni nA) in uscita dagli elettrodi dei sensori. Ogni segnale in uscita dal sensore può essere regolato sia come tensione di zero, grazie a un resistore variabile di precisione, sia in amplificazione, grazie a un secondo resistore variabile. Tale sistema aggiunge flessibilità di utilizzo alla scheda B4, consentendo una modulazione del “range” di concentrazioni rilevabili, e la rende idonea ad ospitare eventuali altri sensori, per specie chimiche gassose diverse, della stessa tecnologia e linea di produzione.

2.3 Architettura dell’Airbox

Il sistema di acquisizione dati è composto da una serie di sensori di gas, particolato, temperatura e umidità relativa, collegati ad una scheda Raspberry PI che ha il compito di acquisire i segnali dai sensori e inviare ad intervalli regolari i file contenenti i dati a un server centrale. Le modalità di trasmissione verso il server sfruttano una connessione di rete in cui si può scegliere tra connessione tramite cavo ethernet, connessione Wi-Fi oppure tramite rete cellulare UMTS. La comunicazione avviene attraverso una VPN (Virtual Private Network) che garantisce un elevato grado di sicurezza anche se l’infrastruttura di trasporto utilizzata è un sistema di trasmissione pubblico e condiviso, tipico di Internet.

L'alimentazione può avvenire attraverso la rete elettrica standard a 220V oppure, nel caso di un utilizzo a bordo di mezzo mobile, da una fonte di corrente continua (12-24V).

Il software di gestione scritto appositamente è in grado di memorizzare le misure anche in assenza di connessione di rete e, a connessione ristabilita, inviare i dati garantendo in questo modo il funzionamento continuativo.

Di seguito verranno analizzati i vari componenti dell'Airbox descrivendone le caratteristiche.

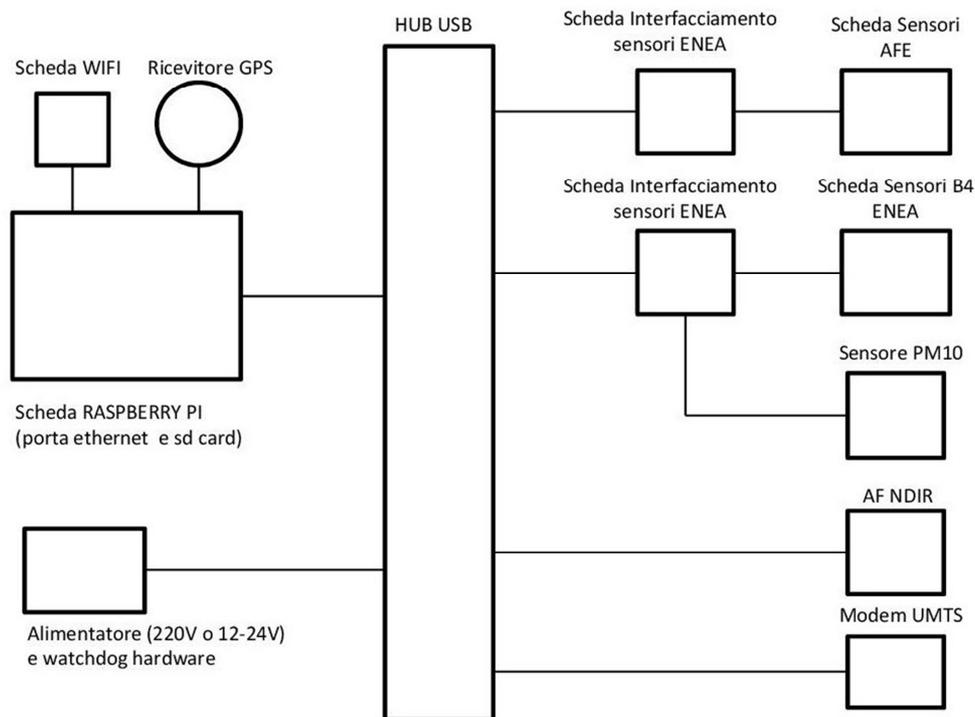


Figura 5. Schema logico dell'Airbox.

La Raspberry PI è un computer su singola scheda, contenente un SoC Broadcom BCM2835, che incorpora un processore ARM1176JZF-S a 700 MHz, una GPU VideoCore IV CPU ARM e 512MB di memoria RAM. La memoria di massa consiste in una scheda SDHC con capacità di 8 GB. Tale scheda, nata come dispositivo economico concepito per stimolare l'insegnamento di base dell'informatica e della programmazione nelle scuole [7], si è rivelata un sistema perfettamente adatto alle necessità del nostro sistema, risultando efficiente dal punto di vista energetico e particolarmente robusto per poter essere utilizzato in ambienti con escursioni di temperatura e umidità elevate. Tra le varie versioni di Raspberry PI, si è optato per il modello B+ (Figura 6) in quanto dotato di un sistema di alimentazione switching più efficiente e di quattro porte USB.



Figura 6. Foto della scheda Raspberry PI modello B+.

Si è scelto di adottare il sistema operativo Debian GNU Linux [8] che è totalmente open source ed ha un numero enorme di applicazioni software gestite da un sistema di installazione dei pacchetti molto flessibile, il quale consente l'upgrade costante alle ultime versioni. Nella nostra applicazione il sistema operativo Linux si è dimostrato assolutamente affidabile e robusto, garantendo il funzionamento costante con un uptime superiore al 90%.

La Raspberry PI è connessa alle 2.1 schede di interfacciamento sensori (par. 2.1) e al resto delle periferiche (antenna GPS, interfaccia Wi-Fi e UMTS) tramite le porte USB a bordo della scheda stessa, oppure attraverso un hub a 7 porte alimentato, in modo da garantire la corretta alimentazione alle periferiche con fabbisogni di corrente più importanti.

Le schede di interfacciamento sensori consentono la lettura di quattro sensori Alphasense, con la possibilità di collegare un sensore ausiliario.

Nell'attuale configurazione dell'Airbox vengono utilizzate due schede di interfacciamento sensori, la prima connessa ad una scheda (par. 2.2) contenente sensori per PM₁₀, temperatura, umidità, e sensori Alphasense B4 per SO₂, O₃, NO₂ e CO. Una seconda scheda è collegata a un gruppo di sensori Alphasense AFE per la lettura di SO₂, CO, VOC e H₂S. Un ulteriore sensore Alphasense NDIR per la lettura del CO₂ è collegato tramite USB alla Raspberry.

Il contenitore utilizzato per alloggiare tutta l'elettronica, i sensori e la scheda Raspberry PI (Figura 7) è una scatola di materiale termoplastico certificata IP55, sulla quale sono state inserite una griglia metallica sul fondo e una griglia di materiale plastico sul frontale.



Figura 7. Foto dell'interno di un Airbox in fase di installazione.

La lettura dei sensori si è dimostrata efficace e paragonabile come precisione e sensibilità ad altri sistemi ben più complessi nonostante non sia stata prevista una ventola, o un sistema di aspirazione dell'aria analogo, e si sia operato con la sola ventilazione naturale. La griglia frontale aiuta inoltre lo smaltimento del calore generato da alimentatore, scheda Raspberry e hub USB, rendendo il sistema affidabile anche alle alte temperature registrate nel periodo estivo in Puglia (anche superiori ai 40°C).

2.3.1 Software di gestione dell'Airbox

Il software progettato per l'Airbox sovrintende a tutte le funzioni necessarie al funzionamento, ovvero:

- riconoscimento schede sensori collegate al sistema;
- acquisizione dati dalle schede sensori e scrittura su file;

- rilevamento della posizione tramite ricevitore GPS;
- invio file verso un server centrale;
- gestione degli errori e cold reboot tramite watchdog hardware;
- ricezione/invio sms di controllo.

Il sistema è stato concepito per essere completamente plug & play, ovvero la connessione di diverse schede interfacciamento sensori e/o Alphasense senza intervento manuale, queste verranno riconosciute durante l'avvio del sistema e l'acquisizione avverrà secondo uno schema prestabilito. Ogni scheda ha un codice identificativo univoco che viene inserito nel file dati ad ogni lettura, in modo da poter riconoscere la sequenza delle grandezze fisiche rilevate.

L'orario dell'ultima acquisizione e i valori letti dalle schede possono essere visualizzati tramite una pagina web che risiede su ciascun nodo (Figura 8). Da questa pagina è possibile effettuare la manutenzione (reboot del nodo, diagnostica, etc.) in remoto del singolo nodo. Viene inoltre generato un file di log attraverso il quale poter intercettare eventuali malfunzionamenti ed avere la possibilità di risolvere sopraggiunti problemi. Sono garantite una connessione SSH verso i nodi e la possibilità di aggiornare il software di acquisizione in qualsiasi momento ed in remoto, anche dopo aver effettuato l'installazione.

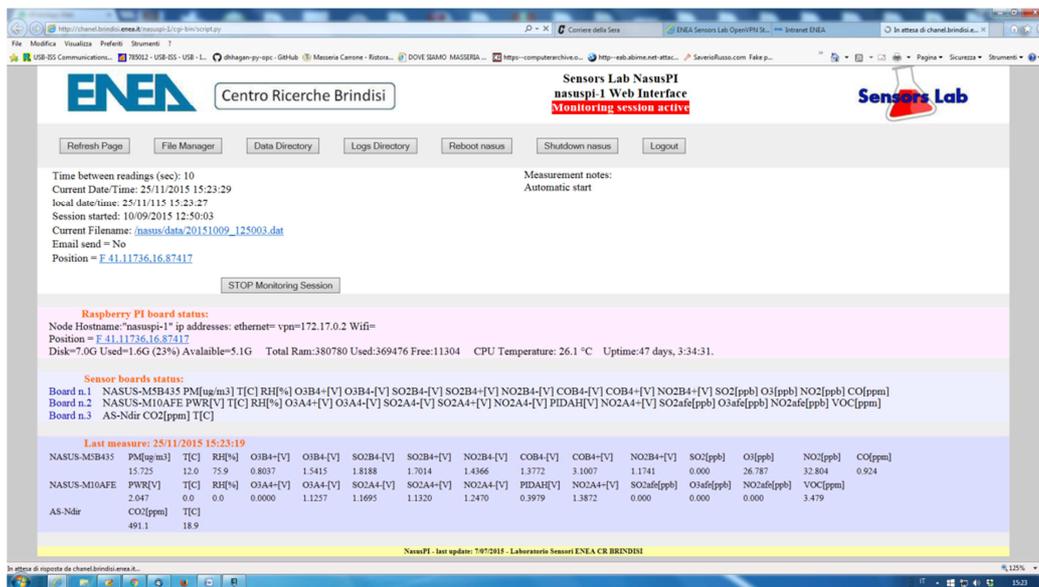


Figura 8. Schermata della pagina web di controllo dell'Airbox.

All'avvio dell'Airbox viene creato su una scheda SDHC un file CSV contenente oltre i dati di misura anche la data e l'ora dell'acquisizione, la posizione del nodo e una descrizione delle schede rilevate nel sistema. Questo file può essere scaricato direttamente dalla pagina web di ciascun nodo e rappresenta il backup totale di tutti i dati acquisiti.

Al tempo stesso viene creato un file parziale, di lunghezza definita, che viene inviato al server centrale a intervalli di tempo regolari. Il software è progettato per controllare eventuali problemi di connessione verso il server (per mancanza di rete UMTS o altri problemi inerenti la rete) e intervenire in modo da assicurare la corretta trasmissione dei file. La connessione dei vari nodi verso il server centrale avviene attraverso una rete privata virtuale per assicurare un canale sicuro per la trasmissione dei dati.

Ogni nodo si sincronizza con data e ora esatti attraverso la connessione a un server ntp, nel caso di assenza di rete UMTS l'orologio interno del sistema viene comunque regolato attraverso l'antenna

GPS con cui ciascun nodo è equipaggiato. L'antenna GPS legge la posizione attuale del nodo e, nel caso di nodi fissi, tale posizione viene bloccata durante l'installazione.

Particolare attenzione è stata dedicata alla gestione degli errori e di eventuali problemi software/hardware. All'avvio del nodo vengono effettuate verifiche sulla connessione delle varie schede, sugli errori nel file system, sulle connessioni del GPS e della rete UMTS: nel caso la verifica fallisca in uno o più controlli, o nel caso di un riavvio non richiesto del nodo, viene inviata una email di segnalazione all'amministratore del server. Il nodo proverà comunque ad effettuare misure e solo per pochi motivi (es. spazio su disco esaurito) andrà in standby e in attesa di intervento manuale. Ciascun nodo è equipaggiato da un modulo watchdog hardware per evitare blocchi del software dovuti a sbalzi di tensione o interferenze (possibili su mezzi mobili o in aree industriali): tale sistema garantisce il riavvio a freddo del nodo tagliando alimentazione allo stesso per 30 secondi e garantendo così il reset totale del sistema. Inoltre, l'avvio del nodo viene effettuato sempre 30 secondi dopo l'inserimento dell'alimentazione per garantire la stabilizzazione della tensione di rete ed evitare eventuali sbalzi che potrebbero compromettere un avvio affidabile.

Il modem UMTS viene utilizzato anche per la ricezione e l'invio di messaggi SMS di controllo: il set di comandi è comunque limitato e viene utilizzato in particolare per il riavvio manuale a freddo o in mancanza di connessione UMTS. Inoltre è possibile interrogare l'Airbox tramite SMS e ricevere in risposta informazioni circa lo stato del nodo, l'uptime e la quantità di dati inviati/ricevuti sulla rete.

Il server centrale, situato presso il CED del Centro Ricerche ENEA di Brindisi, è un Dell PowerEdge R320 (Figura 9), equipaggiato da un processore a 6 core Intel Xeon e 16 Gigabyte di memoria RAM. Per l'archiviazione dei dati vengono utilizzati 6 dischi da 500 GB in configurazione raid5, mentre il sistema operativo Debian GNU Linux gira su due dischi sempre da 500 GB in mirror.

La connessione a internet è ridondata e viaggia su due fibre da 1 GBit di banda, garantita dal GARR [9]. Anche le alimentazioni sono ridondate e collegate su un gruppo di continuità.

Infine è presente un server http per visualizzare lo stato della connessione alla VPN dei singoli nodi (Figura 10) e la gestione degli stessi.



Figura 9. Foto del server Dell.

ENEA Sensors Lab OpenVPN Status Monitor

Enea NasusPI - Connection up, pingable, 11 clients, 200477075 bytes in, 102772056 bytes out [172.17.0.1 tun]

Username / Hostname	VPN IP Address	Remote IP Address	Port	Location	Recv	Sent	Connected Since	Last Ping	Time Online
nasuspi-10	172.17.0.11	5.170.131.238	58515		1806327	873776	29/11/2015 10:11:44	30/11/2015 10:25:44	1 day, 0:20:03
nasuspi-1	172.17.0.2	5.170.172.198	30993		8496665	4153071	25/11/2015 15:32:25	30/11/2015 10:30:06	4 days, 18:59:22
nasuspi-3	172.17.0.4	5.170.40.252	9232		8283583	4053989	25/11/2015 15:57:13	30/11/2015 10:16:37	4 days, 18:34:34
airbox-one	172.17.0.20	192.168.172.238	53361	RFC1918	6032885	6382542	19/11/2015 13:53:04	19/11/2015 13:53:04	10 days, 20:38:43
nasuspi-8	172.17.0.9	5.170.174.197	11954		8290815	4083927	25/11/2015 15:52:06	30/11/2015 10:27:18	4 days, 18:39:41
nasuspi-7	172.17.0.8	62.19.59.138	36495		368480	172026	30/11/2015 08:12:21	30/11/2015 10:22:35	4:19:26
nasuspi-6	172.17.0.7	5.170.31.11	39623		8906847	4107541	25/11/2015 15:31:45	30/11/2015 10:19:11	4 days, 19:00:02
nasuspi-9	172.17.0.10	5.170.103.72	30669		5371409	2566251	27/11/2015 10:42:06	30/11/2015 10:20:57	2 days, 23:49:41
nasuspi-2	172.17.0.3	5.170.197.62	4448		8276782	4061880	25/11/2015 15:43:00	30/11/2015 10:30:10	4 days, 18:48:47
nasuspi-12	172.17.0.13	192.168.173.82	33491	RFC1918	558516	372320	30/11/2015 09:56:46	30/11/2015 10:31:47	0:35:01
nasuspi-4	172.17.0.5	5.170.226.56	28348		8362880	4068711	25/11/2015 15:30:36	30/11/2015 10:20:09	4 days, 19:01:11

Figura 10. Screenshot pagina di gestione della VPN.

3 Gestione dei dati sul server dedicato

Ogni nodo in esercizio produce una quantità di informazioni (dati di misura e di funzionamento) che vengono archiviate sul dispositivo di memoria in dotazione dell’Airbox. Gli stessi archivi possono essere inviati al server dedicato del Laboratorio Test Sensori del Centro Ricerche ENEA di Brindisi per poterne disporre, analizzandoli ove richiesto, anche in tempo reale (senza così dover attendere il termine dell’attività programmata del nodo o senza per questo dover prevedere un periodico intervento *in loco* di un operatore).

Gli archivi prodotti da ogni singolo nodo sono file di testo con codifica ASCII, di facile lettura senza l’installazione di specifici applicativi. I file sono codificati seguendo le notazioni prassi dei file CSV che utilizzano un carattere separatore per definire la sequenza dei dati registrati.

Così facendo, prima di esser resi disponibili per divulgazione totale o limitata, i dati di misura vengono filtrati, validati ed elaborati: queste operazioni sono eseguite a livello di server con procedure dedicate ed appositamente sviluppate.

3.1 Definizione del periodo di riferimento per la sintesi dei dati e criteri di validazione

Le operazioni di sintesi eseguite sui valori di misura sono riferite ad intervalli di tempo regolari che, se non modificati, sono impostati allo standard di 1 ora.

Più in generale l’orario t_{label} cui vengono associati i valori elaborati va inteso come “fino a” e quindi, se è Δt_{rif} l’intervallo di tempo adottato, saranno prese in considerazione tutte le misure che faranno riferimento ad un orario t tale che:

$$t_{label} - \Delta t_{rif} < t \leq t_{label}$$

Con l’impostazione standard del periodo di riferimento, in corrispondenza del minuto 0 e secondo 0 di ogni ora sono riportati i dati relativi all’ora precedente cosicché, ad esempio, i dati che fanno riferimento alle 18.00.00 del 25/11/2015 sono il risultato delle elaborazioni dei valori misurati

nell'intervallo che va dalle 17.00.01 del 25/11/2015 alle 18.00.00 del 25/11/2015 (estremi compresi).

Tutti i dati di misura sono sottoposti ad un controllo di validazione di primo livello che, misura per misura, verifica che il valore riportato cada all'interno di un intervallo al di fuori del quale la misura non è ritenuta attendibile.

Per le misure da postazione fissa i dati calcolati sono integrati, per ogni nodo, per ogni specie/grandezza e per ogni ora (o altro periodo di riferimento) da un “*Numerosity Index*” (in seguito NI) che indica quanti (in termini percentuali) dei dati che sarebbero dovuti arrivare nel periodo di riferimento hanno superato il controllo di validazione fornendo una misura di fatto utilizzata per i calcoli di cui sopra (numero di dati validi/numero di dati attesi $\times 100$).

L'unione dei dati elaborati e dei valori degli NI dà modo di eseguire un secondo controllo di validazione per trasmettere le sole informazioni relative ad un numero di misure significativo ovvero non trascrivere i dati elaborati qualora nel periodo di riferimento il relativo NI non abbia raggiunto il livello minimo impostato.

La presenza del valore di NI consente all'utenza di “pesare” la consistenza del dato di misura sintetizzato.

3.2 Strutture dei file dati di output e sequenza di scrittura delle misure

I risultati delle elaborazioni cadenzate sul server vengono registrati con scritture differenti a seconda che i dati di misura provengano da postazioni fisse o da postazioni mobili.

Se per le postazioni fisse si esegue una sintesi per periodi temporali dei dati di misura, per le postazioni mobili si eseguono controlli di validazione dei dati georeferenziati.

Sui dati provenienti dalle postazioni fisse, per ogni periodo di sintesi, sono eseguiti due tipi di operazione:

- calcolo dei valori orari minimo, massimo e medio (Figure 11-13);
- calcolo degli Indici di Qualità dell'Aria (in seguito IQA);

i cui output sono registrati in due strutture di archivi differenti, rispettivamente di tipologia ENV, e tipologia AQI.

Sulle misure delle postazioni mobili sono calcolati, per ogni record di dati, i valori istantanei degli IQA (file di tipologia MOB).

I file prodotti seguono la prassi dei file Comma-Separated Value (file con estensione CSV) con righe di dati (o record) divise in campi separati dalla virgola. La scelta di questo tipo di codifica è legata alla volontà di consentire una massima portabilità ed usabilità dei file elaborati.

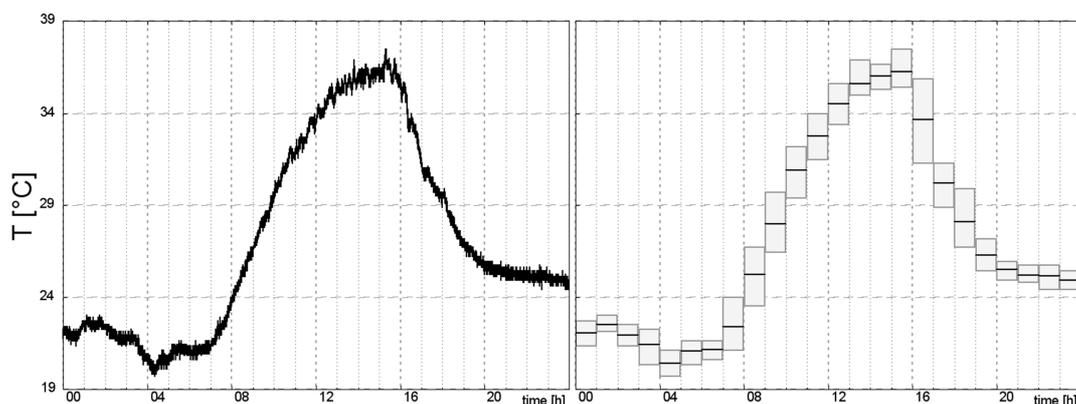


Figura 11. Esempio di passaggio dai dati grezzi (sinistra) ai valori sintetizzati (a destra).

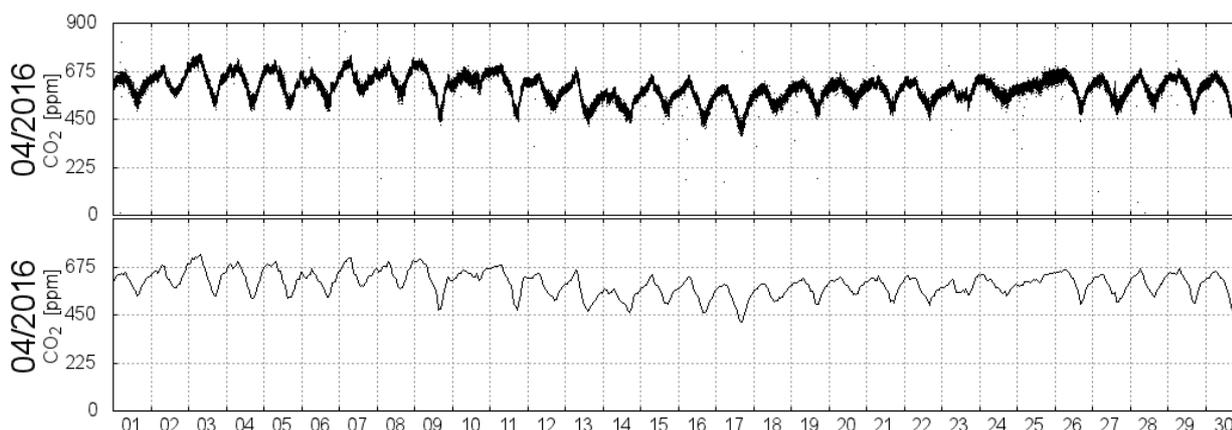


Figura 12. Esempio di passaggio dai dati grezzi (sopra) ai valori medi orari sintetizzati (sotto) delle misure di CO₂ del mese di aprile 2016.

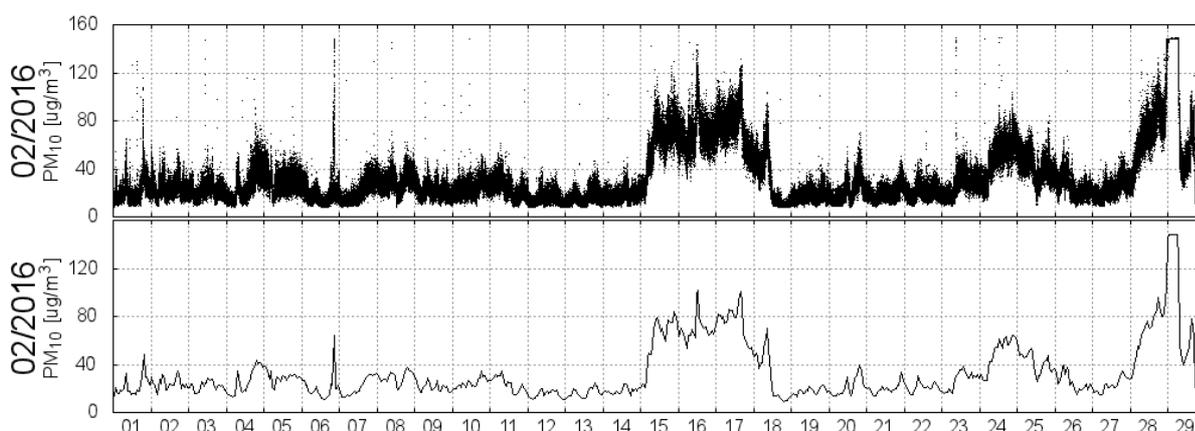


Figura 13. Esempio di passaggio dai dati grezzi (sopra) ai valori medi orari sintetizzati (sotto) delle misure di PM₁₀ del mese di febbraio 2016.

Tipo di nodo	Tipo di dati	Tipologia dei file di output
Nodi fissi	↗ Sintesi dei dati ambientali	ENV
	↘ Indici qualità dell'aria	AQI
Nodi mobili	→ Ambientali + IQA georeferenziati	MOB

Tabella 4. Tipologie dei file di output.

In fase di impostazione dell'esecuzione dei programmi viene definita la struttura dei file di output in termini di sequenza delle specie e/o grandezze che saranno elaborate con procedura automatica.

Tutte le grandezze possono essere analizzate per produrre file della tipologia ENV, mentre temperatura T ed umidità relativa RH (comunque presenti tra le informazioni inviate dagli Airbox) non sono incluse nei file AQI dei nodi fissi.

Opportuni flag sono inseriti al posto di una delle misure quando per un nodo non si rende disponibile la misura di una delle grandezze (o perché non prevista sul nodo, o perché non ha passato i controlli di validazione).

Per i dati ambientali dei nodi fissi, per ciascuna delle grandezze previste, sono trasmessi 4 valori, nell'ordine: minimo, medio, massimo e numerosity index (Figura 14).

Per i dati sugli IQA dei nodi fissi, per ciascuna delle specie/grandezze previste, sono trasmessi 2 valori, nell'ordine: IQA e NI (Figura 15).

Per quanto riguarda i nodi mobili, per ciascuna delle specie/grandezze sopra riportate, sono trasmessi 2 valori, nell'ordine: valore di misura e IQA (eccetto che per T e RH) (Figura 16).



Figura 14. Struttura dei file elaborati ENV (nodi fissi).

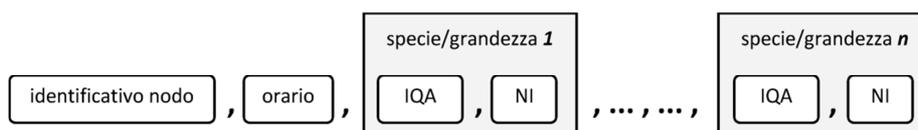


Figura 15. Struttura dei file elaborati AQI (nodi fissi).

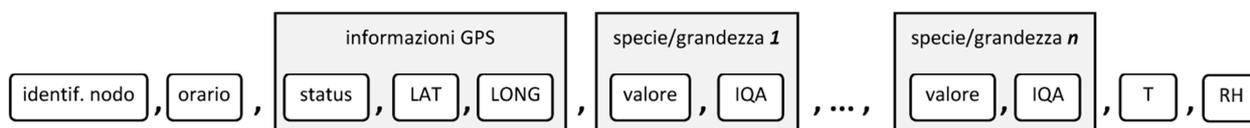


Figura 16. Struttura dei file elaborati MOB (nodi mobili).

3.3 I programmi di elaborazione dei dati di misura

Due programmi per la sintesi e l'elaborazione dei dati dei nodi di misura gestiscono, uno, i file dati da nodo fisso e, l'altro, i dati da nodo mobile.

Entrambi i programmi devono di volta in volta "essere istruiti", per definire quali elaborazioni debbano condurre e su quali dati debbano intervenire, tramite più file di configurazione con i quali si definiscono:

- le specie/grandezze che devono essere elaborate indicandone, nell'unità di misura prestabilita e riportata, i limiti (inferiore e superiore) all'interno dei quali considerare valido il dato e la soglia di riferimento per il calcolo dell'IQA;
- quali nodi di sensori includere nell'elaborazione e, per ciascuno dei nodi indicati, quale delle specie/grandezze prendere in considerazione unitamente alla posizione del relativo dato nella sequenza di misure trasmesse dal nodo.

Intervenendo su questi file di configurazione è possibile, laddove opportuno, escludere dalla sintesi ed elaborazione delle misure eventuali dati provenienti da sensori dei quali si dovesse riscontrare un malfunzionamento senza inficiare per questo la corretta esecuzione delle routine per le rimanenti specie/grandezze.

Ad esecuzione conclusa sono prodotti file di log con i quali, oltre al controllo delle operazioni appena eseguite e alla registrazione dei file dati elaborati, si tiene traccia dello stato di avanzamento delle elaborazioni (in termini temporali) per ciascuno dei nodi. Con questi file di log si mette in condizioni il server di eseguire le elaborazioni successive senza tornare ad analizzare dati e file grezzi già trattati. Al tempo stesso gli operatori possono essere aggiornati sul susseguirsi delle operazioni cadenzate periodicamente sul server.

4 Statistiche sul funzionamento dei nodi, sulla elaborazione, produzione e sintesi dei dati

I primi Airbox, dopo attenta fase di test e verifiche funzionali, sono entrati in fase operativa a fine luglio 2015 e sono, al momento della stesura di questo documento (luglio 2016), ancora attivi (oltre 12 mesi di esercizio).

Complessivamente sono stati realizzati dispiegati più di 10 dispositivi che non hanno manifestato malfunzionamenti “fisiologici” e per i quali non si è verificata casistica di rottura dei componenti.

Parte consistente delle attività ha trovato spinta e capacità esecutive grazie alla partecipazione del Laboratorio al Progetto PON RES-NOVAE (Reti, Edifici, Strade - Nuovi Obiettivi Virtuosi per l’Ambiente e l’Energia) con il quale è stata di fatto realizzata una rete di sensori per il controllo della qualità dell’aria nella città di Bari .

Alle ore 24 del 30 aprile 2016 il nodo dall’esercizio più longevo, la cui attività avviata il 21 luglio 2015 è stata integralmente riportata in Appendice, era attivo da oltre 280 giorni ed aveva inviato con continuità al server oltre 27000 archivi di misurazioni per una quantità di dati superiore a 560 MB. Nello stesso periodo l’Airbox ha avuto un unico arresto di funzionamento dovuto all’interruzione della rete di alimentazione (causa esterna all’Airbox). Il solo sensore di CO₂ ha manifestato un malfunzionamento prontamente intercettato dai software di controllo.

Le operazioni di filtraggio, validazione e sintesi dei dati eseguite a livello di server con cadenza oraria hanno dato luogo a più di 6800 elaborazioni con la produzione di altrettanti file ENV di dati ambientali e altrettanti file AQI contenenti indici di qualità dell’aria orari.

I file così prodotti hanno avuto un peso rispettivamente di 1,75 MB e 0,54 MB per una “compressione” con il passaggio dai dati grezzi ai dati sintetizzati superiore al 99%.

5 Discussione

I risultati ottenuti usando il dispositivo multi-parametrico Airbox per la qualità dell’aria sono presentati in Appendice, utilizzando la media giornaliera su base oraria per report mensili nel periodo da luglio 2015 ad aprile 2016.

I dati misurati dai sensori nel nodo Airbox, operativo presso la sede ENEA di Bari, sono aggregati e discussi per tipologia:

- parametri ambientali (temperatura, umidità relativa);
- gas clima-alterante (CO₂);
- gas inquinanti (CO, NO₂, O₃);
- composti organici volatili (VOC) totali;
- polveri sottili (PM₁₀).

Parametri ambientali (temperatura ed umidità relativa)

Gli andamenti giornalieri mensili della temperatura ed umidità relativa registrati dai sensori hanno avuto un’escursione stagionale variando secondo un relativo intervallo seguente:

- ✓ Temperatura: nella stagione estiva, la temperatura massima registrata è di 42°C (agosto 2015), mentre la temperatura minima registrata è di 15°C (settembre 2015). Nella stagione invernale, la temperatura massima registrata è di 25°C (febbraio 2016), mentre la temperatura minima registrata è di 3°C (gennaio 2016). Infine, nella stagione primaverile, la temperatura massima registrata è di 34°C (aprile 2016), mentre la temperatura minima registrata è di 6°C (marzo 2016). Il mese di luglio 2015 ed agosto 2015 sono risultati molto caldi come anche

evidenziato dai dati ufficiali nazionali con temperature medie di 30-35°C, alle latitudini della città di Bari.

- ✓ **Umidità Relativa:** nella stagione estiva (luglio - settembre 2015), l'umidità relativa è variata tra il 25% ed il 90%, con picchi giornalieri orari registrati prevalentemente nei mesi di luglio ed agosto 2015. Nella stagione autunnale (ottobre-dicembre 2015), l'umidità relativa è variata tra il 30% ed il 90%, con picchi giornalieri orari registrati prevalentemente nei mesi di ottobre, novembre e dicembre 2015. A dicembre 2015, il minimo registrato è stato di 45%. Nella stagione invernale (gennaio-febbraio 2016), l'umidità relativa è variata tra il 25% ed il 90%, con picchi giornalieri orari registrati prevalentemente in entrambi i mesi di indagine. A gennaio 2016, il minimo registrato è stato di 25%. Infine, nella stagione primaverile (marzo-aprile 2016), l'umidità relativa è variata tra il 23% ed il 92%, con picchi giornalieri orari registrati prevalentemente in entrambi i mesi di indagine. Ad aprile 2016, il minimo registrato è stato di 23%. Tali andamenti dell'umidità relativa riflettono i cicli stagionali delle latitudini della città di Bari, come confermato dai dati di riferimento ufficiali.

Gas clima-alterante (CO₂)

L'anidride carbonica (CO₂) è un gas serra che altera il clima del pianeta provocando riscaldamento globale terrestre. Le cause di incremento della emissione della CO₂ sono riconducibili ad azioni antropiche di varia natura (riscaldamento domestico, emissioni industriali, scarichi autoveicoli, ecc.). Il valore globale medio della CO₂ si attesta a 400 ppm nel 2015. Ovviamente, tale valore dipende da fattori locali e dalle condizioni meteo specifiche (vento, precipitazione, irraggiamento) di contesto urbano.

In particolare, il nodo Airbox, operativo presso la sede ENEA di Bari, ha registrato andamenti ciclici giornalieri variando da 225 ppm a 450 ppm nel periodo da luglio a ottobre 2015, mostrando una tendenza incrementale da 450 ppm ad ottobre 2015 fino a 675 ppm ad aprile 2016. L'errore della misura del sensore può essere stimata intorno al 20-25%. Generalmente, nell'arco del giorno, il valore della CO₂ presente nell'aria urbana tende a decrescere nella seconda metà della giornata, dopo mezzogiorno e prevalentemente nel pomeriggio.

Considerazioni di carattere generale sull'andamento della CO₂ necessitano di analisi di ulteriori dati della rete sensori per la qualità dell'aria, esercita nella città di Bari per una campagna di lunga durata (superiore ad 1 anno).

Gas inquinanti (CO, NO₂, O₃)

I 3 gas inquinanti indicati sono alcuni dei principali responsabili per determinare la qualità dell'aria urbana. Per ognuno di loro sono stati fissati dei valori limiti di soglia stabiliti per legislazione comunitaria e nazionale:

- massimo giornaliero: 8 ppm CO (10 mg/m³)
- massimo giornaliero: 100 ppb NO₂ (200 µg/m³)
- massimo giornaliero: 90 ppb O₃ (180 µg/m³)

In particolare, il nodo Airbox, operativo nel periodo, ha registrato dati giornalieri su base oraria con accuratezza stimata del 30% (CO), 35% (NO₂) e 35% (O₃).

- ✓ **Monossido di carbonio (CO):** nel periodo di riferimento, il nodo ha registrato un valore medio di CO variante tra 1.0 - 1.5 ppm, sempre inferiore al valore limite di soglia di 8 ppm. Nessun sfioramento è stato registrato dal sensore, come censito da ARPA Puglia con i metodi di riferimento analitico. Questo abilita il sensore a basso costo di CO ad essere usato per la consapevolezza della qualità dell'aria con un'accuratezza accettabile.

- ✓ **Biossido di azoto (NO₂):** nel periodo luglio-settembre 2015, il nodo ha registrato valori di picco di NO₂ anche fino a 80 ppb; mentre nel periodo ottobre-dicembre 2015, il nodo ha registrato valori di picco fino a 60 ppb; con una tendenza decrescente nei mesi di gennaio e febbraio 2016 fino a valori di picco di 50 ppb (< 60 ppb), ed infine nei mesi di marzo e aprile 2016, valori di picco non superiori a 60 ppb.
- ✓ **Ozono (O₃):** nel periodo luglio-settembre 2015, il nodo ha registrato valori di picco di O₃ anche fino a 100 ppb; mentre nel periodo ottobre-dicembre 2015, il nodo ha registrato valori di picco fino a 60 ppb; con una tendenza decrescente nei mesi di gennaio e febbraio 2016 fino a valori di picco di 50-60 ppb, ed infine nei mesi di marzo e aprile 2016, valori di picco raramente superiori a 60 ppb. Normalmente, l'ozono è presente in concentrazione elevata nel periodo estivo rispetto al periodo invernale, a causa del forte irraggiamento UV estivo.

Composti Organici Volatili (VOC)

I composti organici volatili comprendono sostanze chimiche volatili alla temperatura ambiente come il benzene, toluene, etil-benzene, xylene, alcoli, chetoni, esteri, idrocarburi policiclici aromatici, mercaptani, ecc. Tali sostanze sono estremamente nocive per la salute e l'ambiente ed il valore di soglia della concentrazione di ogni singola sostanza è estremamente basso e dell'ordine di decine di parti per miliardo (ppb). Pertanto, la sommatoria totale delle centinaia di sostanze volatili disperse nell'ambiente urbano potrebbe aumentare di vari ordini di grandezza fino a qualche parte per milione (ppm). Il nodo Airbox ha misurato un valore totale di VOC variante tra 1.1 e 1.2 ppm nell'intero periodo di osservazione mostrando un andamento quasi costante nei vari mesi presi in esame.

Polveri Sottili (PM₁₀)

Le polveri sottili (PM₁₀) sono particelle aero-disperse nell'ambiente con diametro inferiore a 10 µm ed indipendentemente dalla loro natura chimica sono altamente nocive per la salute umana in quanto se inalate provocano gravi malattie polmonari. Le polveri sottili derivano da emissioni di autoveicoli, processi industriali, fenomeni naturali. Il valore limite giornaliero per il PM₁₀ consentito dai regolamenti legislativi nazionali e direttive comunitarie (EC/2008/50) è di 50 µg/m³. Normalmente, i valori di PM₁₀ registrati durante l'inverno nelle città, specie a bassa ventilazione o scarse precipitazioni piovose, sono superiori nella stagione invernale rispetto alla stagione estiva. Il nodo Airbox, operativo presso la sede ENEA di Bari, ha registrato, con un errore stimato intorno al 30-35%, andamenti giornalieri variando da 10 µg/m³ a 40 µg/m³ nel periodo da luglio a ottobre 2015, mostrando una tendenza incrementale di picchi oltre i 40 µg/m³ nei mesi di novembre 2015, dicembre 2015 e gennaio 2016. Mentre una misura media di PM₁₀ inferiore alla soglia regolamentare è stata registrata nei mesi di febbraio 2016, marzo 2016 ed aprile 2016, con vari eventi di picchi non riconducibili a cause antropiche. Infatti, durante il periodo di esercizio del nodo riportato nel presente report si sono registrati alcuni rilevanti fenomeni di avvezione di polveri sahariane, censiti dall'ARPA Puglia [10]: tutti questi fenomeni hanno avuto una manifestazione a livello di misure con un incremento dei valori di PM₁₀ nelle seguenti giornate:

- dal 14 al 19 settembre 2015;
- dal 15 al 17 febbraio 2016;
- dal 28 al 29 febbraio 2016;
- dal 22 al 23 marzo 2016.

Tutti questi eventi, di carattere naturale e non antropico, sono stati intercettati dall'Airbox installato mostrando l'efficacia del nodo multi-parametrico a basso costo per rilevare eventi significativi di interesse ambientale per aumentare la consapevolezza ambientale dei cittadini.

6 Conclusioni

Il documento ha descritto la progettazione, realizzazione e messa in esercizio di un dispositivo multisensoriale per il monitoraggio della qualità dell'aria. Il dispositivo, chiamato *Airbox*, è stato replicato in più unità ed è stato realizzato in maniera da poter essere allestito con sensori di tipologia differente con caratteristiche "plug and play". Grazie ai ridotti ingombro e peso, che consentono un alto grado di portatilità, ed ai contenuti assorbimenti elettrici, l'Airbox presenta semplicità di installazione e messa in esercizio. L'installazione di più Airbox, avvenuta nell'ambito del Progetto PON RES-NOVAE, è stato un positivo banco di prova per una verifica di lunga durata della bontà della progettazione dell'insieme hardware e software.

Alla luce dell'assenza di guasti interni, i dispositivi sensori hanno dimostrato di poter affrontare campagne di lunga durata confermando, grazie anche ad un costo realizzativo contenuto rispetto alla strumentazione analitica di riferimento, la predisposizione per la realizzazione di reti di sensori complementari alle stazioni tradizionali per il monitoraggio della qualità dell'aria con un numero elevato di punti di misura distribuiti in contesto urbano ad elevato impatto osmogeno. Infine, il basso costo del sistema Airbox e della sua manutenzione consente di sviluppare sistemi di facile installazione con relative applet per accrescere la consapevolezza ambientale dei cittadini in maniera pervasiva.

Nel futuro si procederà con un lavoro volto a migliorare la periodica calibrazione dei sensori in maniera automatizzata, al fine di aumentare l'accuratezza della misura secondo gli obiettivi di qualità.

Ringraziamenti

Le attività descritte in questo documento hanno ricevuto una grande accelerazione grazie alla partecipazione del Laboratorio Test Sensori del Centro Ricerche ENEA di Brindisi al Progetto PON Smart Cities RES-NOVAE (Reti, Edifici, Strade - Nuovi Obiettivi Virtuosi per l'Ambiente e l'Energia) finanziato dal MIUR.

Gli Autori ringraziano il Dott. Michel Gerboles e Dott. Laurent Spinelle del Joint Research Centre (JRC), Institute for Environment and Sustainability, Air and Climate Unit, di Ispra (VA) per la collaborazione tecnico-scientifica nella valutazione della performance dei sensori di basso costo per la qualità dell'aria.

Gli Autori ringraziano altresì il collega Gennaro Cassano per il supporto tecnico alle attività del Laboratorio.

Tali attività sono in linea con le attività di networking internazionale della COST Action TD1105 [11] *EuNetAir - European Network on New Sensing Technologies for Air Pollution Control and Environmental Sustainability* - coordinata da ENEA nel periodo 2012-2016.

Appendice

A. Presentazione di un Airbox e del suo esercizio

Quanto presentato in Appendice fa riferimento all'Airbox installato presso la Sede ENEA di Bari (via Japigia, 228, Lat. = 41.11259 – Long. = 16.89963).

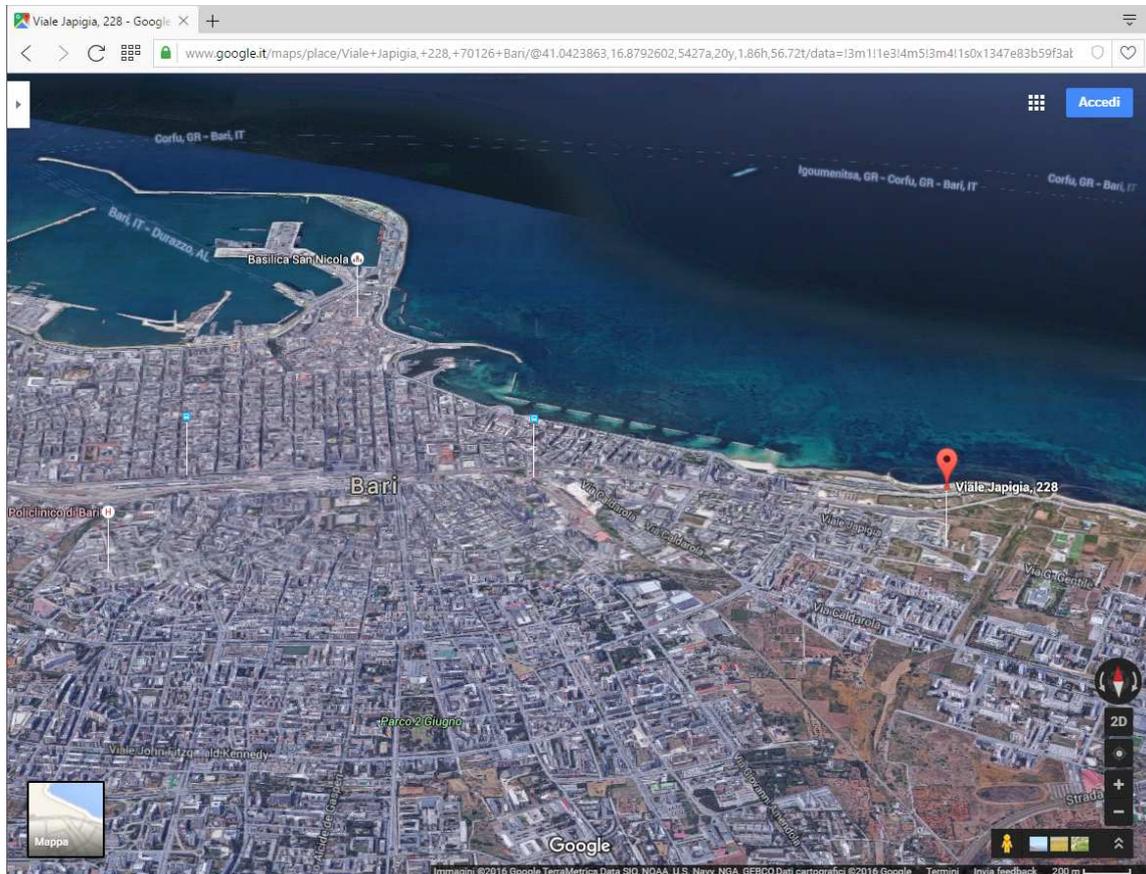


Figura 17: ubicazione dell'Airbox.



Figura 18: Airbox posizionato.

A.1 Operazione di taratura della scheda sensori elettrochimici

La scheda sensori sviluppata nei Laboratori è stata progettata per poter ospitare quattro sensori di tipo elettrochimico della linea a quattro elettrodi prodotta dalla Alphasense Ltd. Il tipo di sensori montati sulla nostra scheda è idoneo alla rilevazione di CO, NO₂, O₃ e SO₂ e sono denominati rispettivamente: COB4 [11], NO2B4 [12], OXB431 [13] e SO2B4 [14]. Il segnale prodotto dai sensori è costituito da una debole corrente dell'ordine di qualche nA la cui intensità è legata alla concentrazione del gas da monitorare. L'elettronica progettata e implementata sulla scheda traduce il segnale in corrente originato dai sensori in un segnale di tensione con un'amplificazione e uno zero regolabili. Benché, in linea di principio, sia possibile calcolare a priori le costanti e i parametri caratterizzanti la legge di conversione tra tensioni di uscita della scheda e concentrazioni di gas, gli inevitabili errori sui parametri caratterizzanti i sensori e sui parametri propri della componentistica elettronica che costituisce la scheda, in aggiunta alla estrema esigenza di precisione derivata dalla necessità di rilevare concentrazioni molto basse di gas, rendono indispensabile una taratura del sistema in laboratorio. L'operazione di taratura è stata effettuata presso i laboratori del "Joint Research Center, Institute for Environment and Sustainability, Air and Climate Unit". In sintesi, essa consiste nell'esporre il dispositivo da tarare a concentrazioni di gas note e misurate con analizzatori chimici di riferimento a temperatura ed umidità costanti. Il dispositivo, che nel nostro caso è rappresentato dall'intera scheda sensori su cui sono stati montati i quattro sensori, posto in una camera climatica, risponde alle diverse concentrazioni di gas con una variazione di tensione in uscita correlata con la curva della concentrazione del gas a cui il dispositivo è esposto. Sulla base delle indicazioni fornite dal costruttore dei sensori elettrochimici, si ipotizza che la legge di conversione tra concentrazione del gas e le tensioni in uscita della scheda elettronica relativa ad ogni singolo sensore sia del tipo:

$$C = S ((V_w - V_A) - (V_{w0} - V_{A0}))$$

nella quale: C è la concentrazione del gas in ppb, S è il fattore di sensibilità espresso in ppb/Volt, V_w è la tensione relativa al canale dell'elettrodo "working" del sensore, V_A è la tensione relativa al canale dell'elettrodo "auxiliary" del sensore, V_{w0} è la tensione relativa al canale dell'elettrodo "working" del sensore quando è esposto all'aria di zero (ossia miscela gassosa in cui è assente l'analita), V_{A0} è la tensione relativa al canale dell'elettrodo "auxiliary" del sensore quando è esposto all'aria di zero.

Dall'analisi dei dati registrati durante il "test" di taratura è quindi possibile risalire ai parametri non noti che caratterizzano la legge di conversione. Applicando il risultato di tali elaborazioni alla curva delle tensioni registrata durante il "test" di taratura, si sono ricavate le indicazioni delle concentrazioni di gas fornite dai sensori in prova. Nelle figure sottostanti, le curve delle concentrazioni di gas indicate dai sensori dopo la taratura sono confrontate con quelle date dalla strumentazione di riferimento; da tale confronto si è potuto rilevare l'attendibilità della legge di conversione ricavata tramite questi "test".

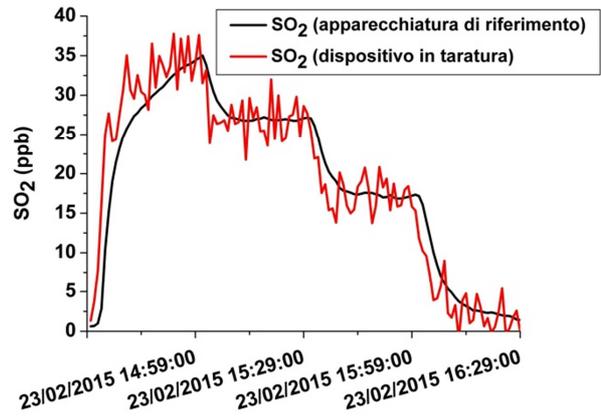
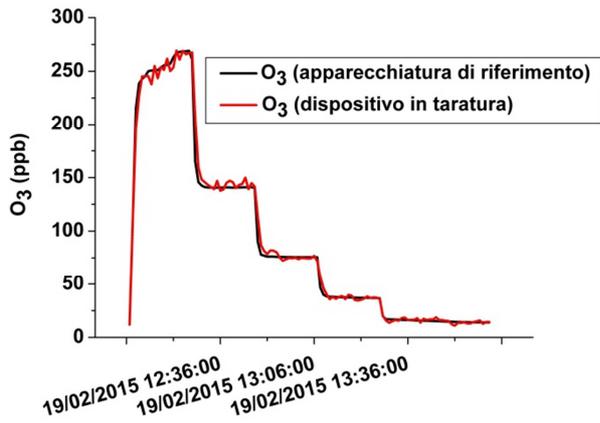
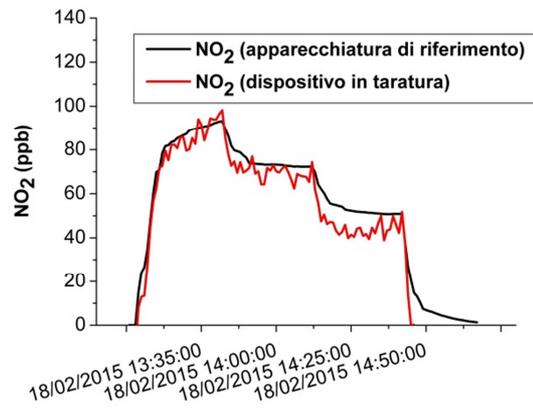
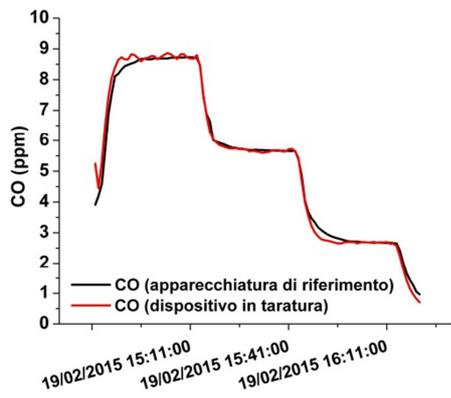
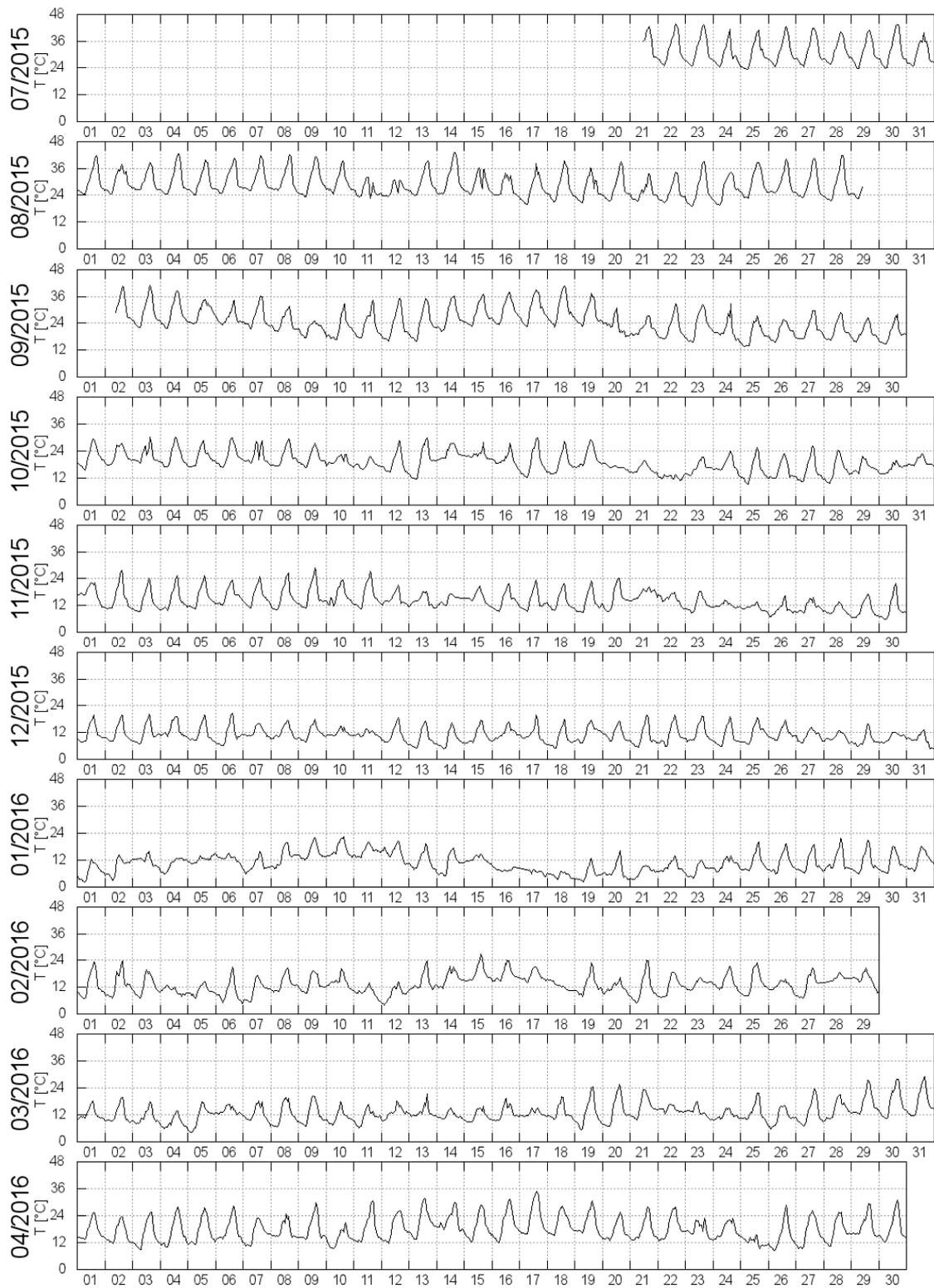


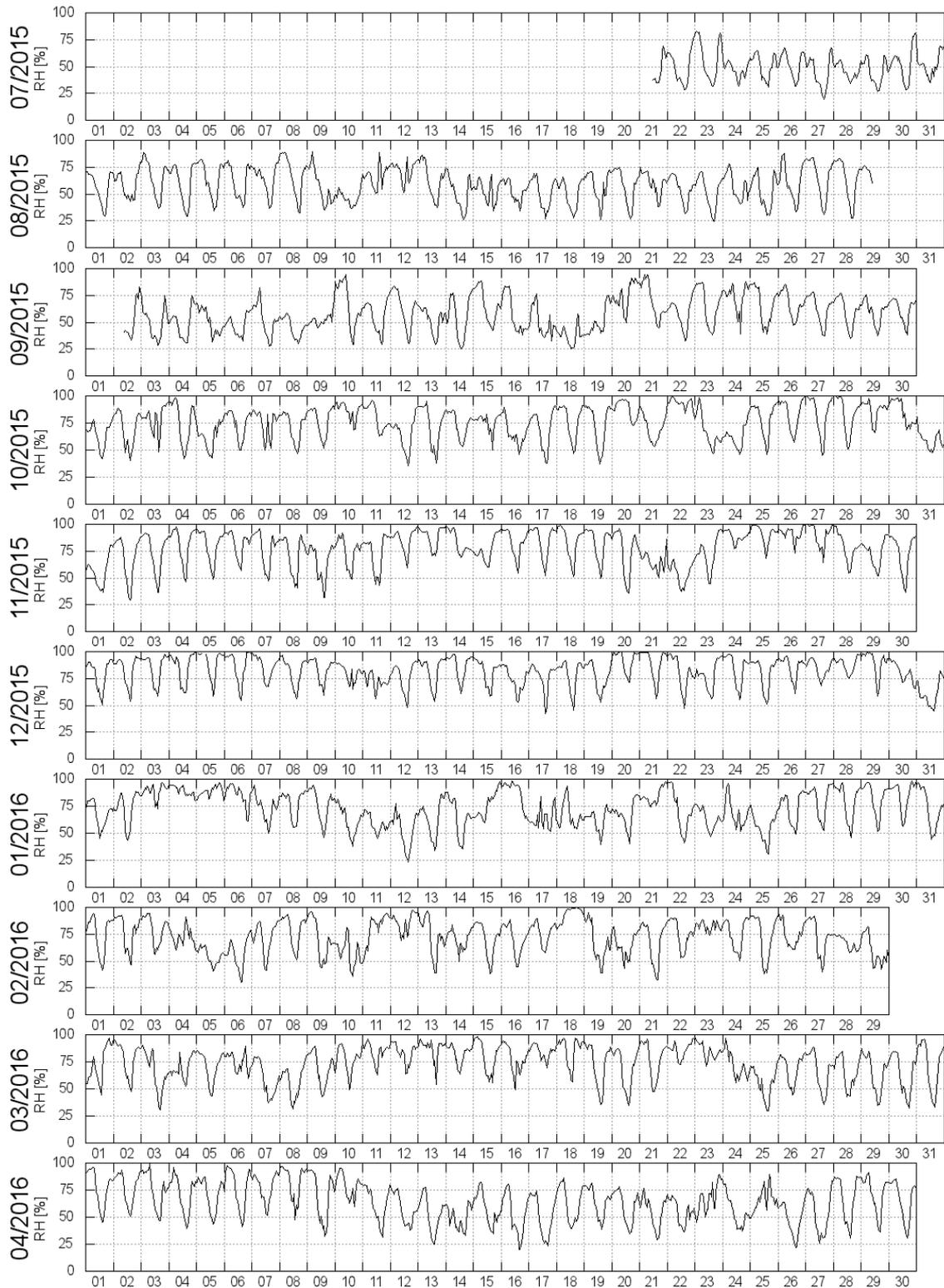
Figura 19: confronto tra le curve delle concentrazioni dell'Airbox e dell'apparecchiatura di riferimento.

A.2 Dati sintetizzati dal posizionamento (luglio 2015) a tutto aprile 2016

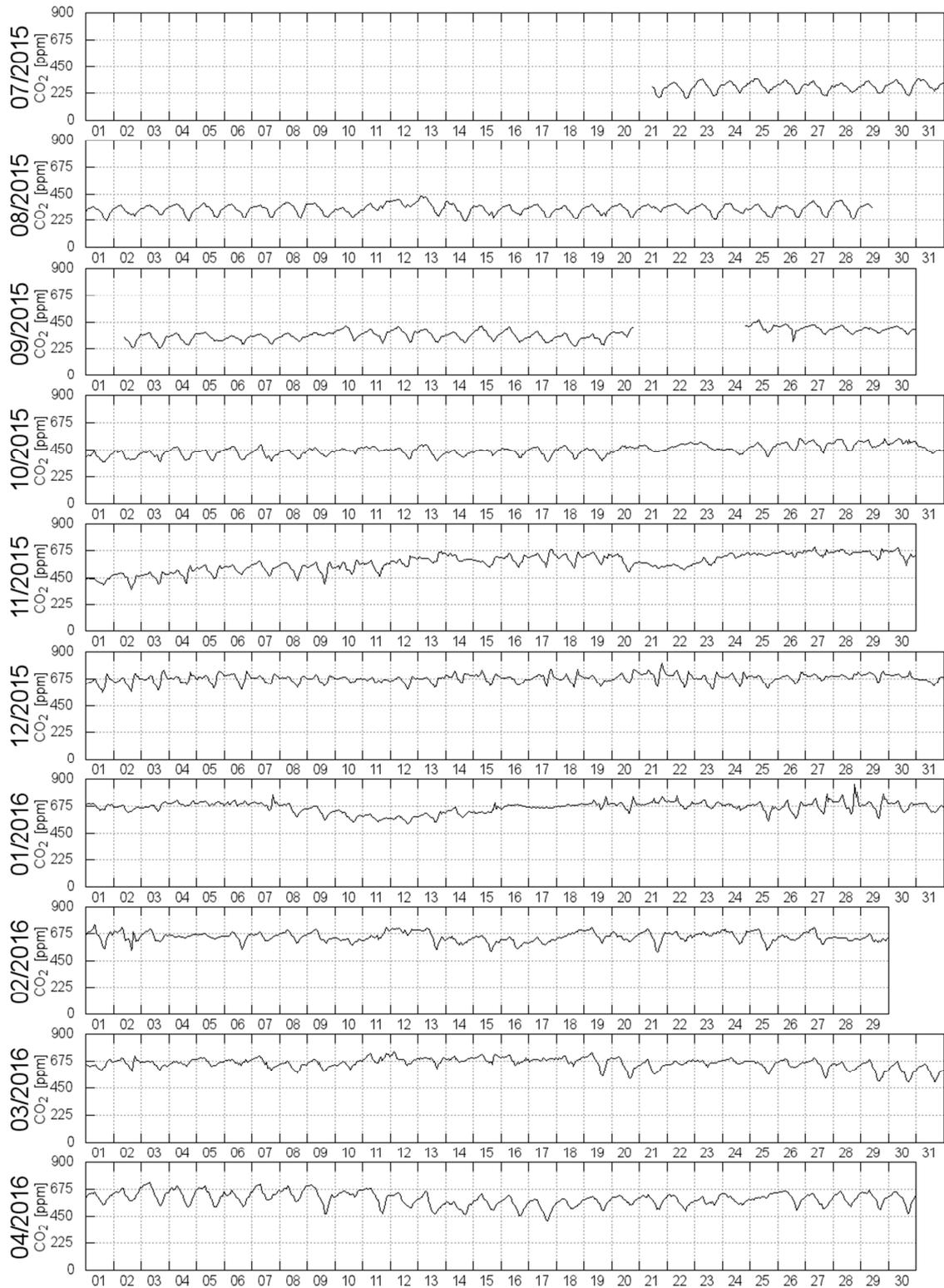
Temperatura



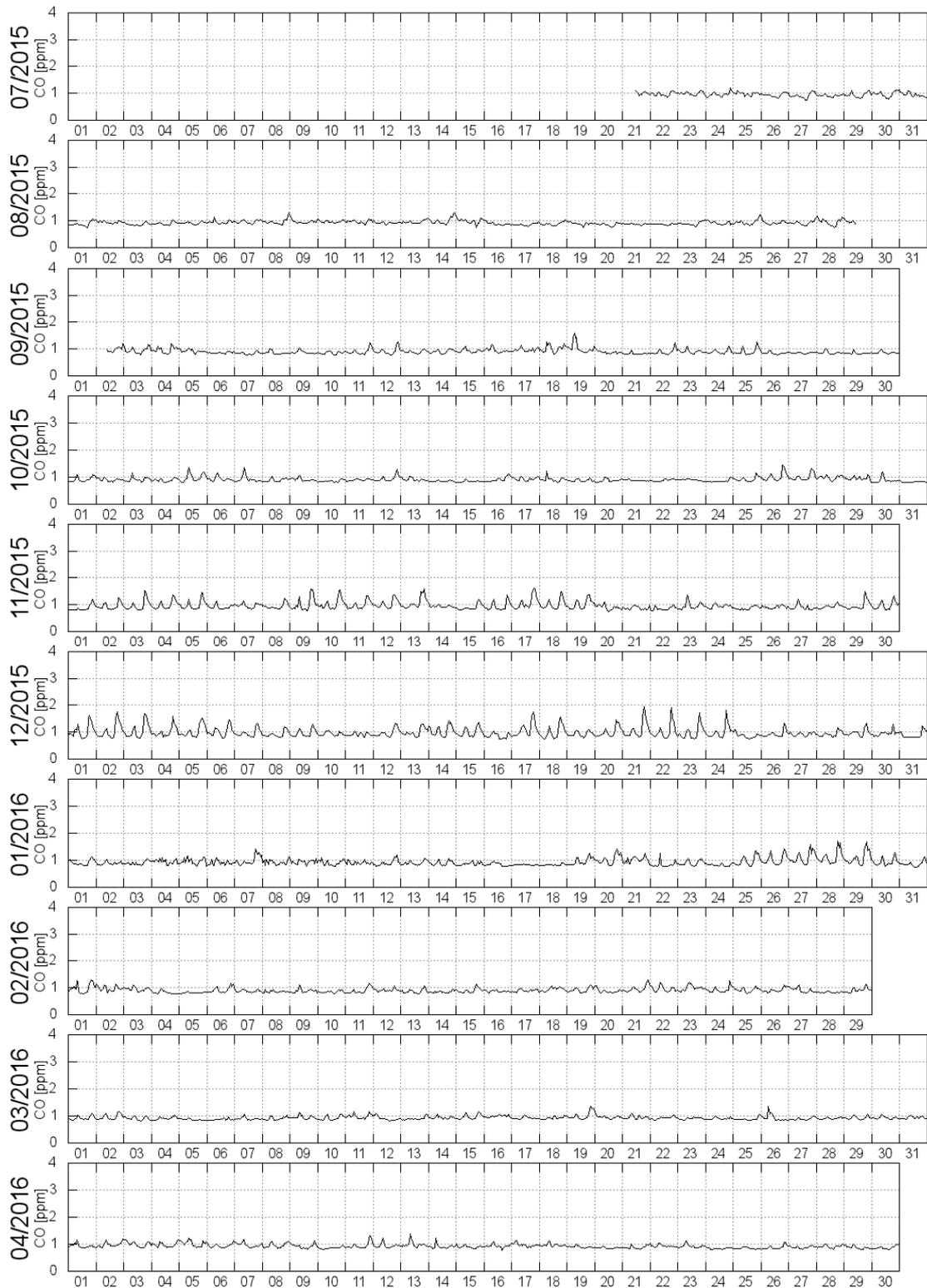
Umidità Relativa



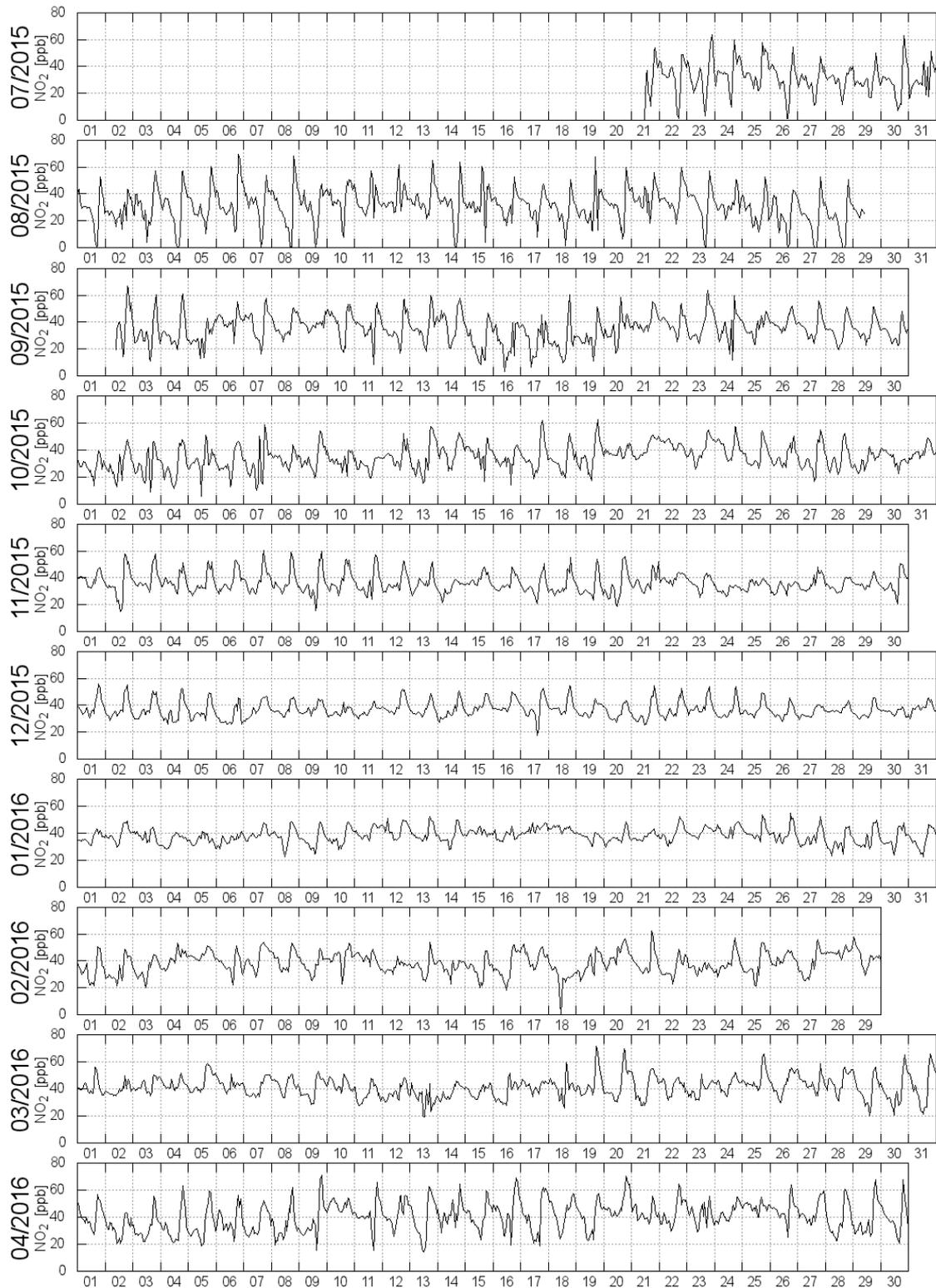
Anidride Carbonica (CO₂)



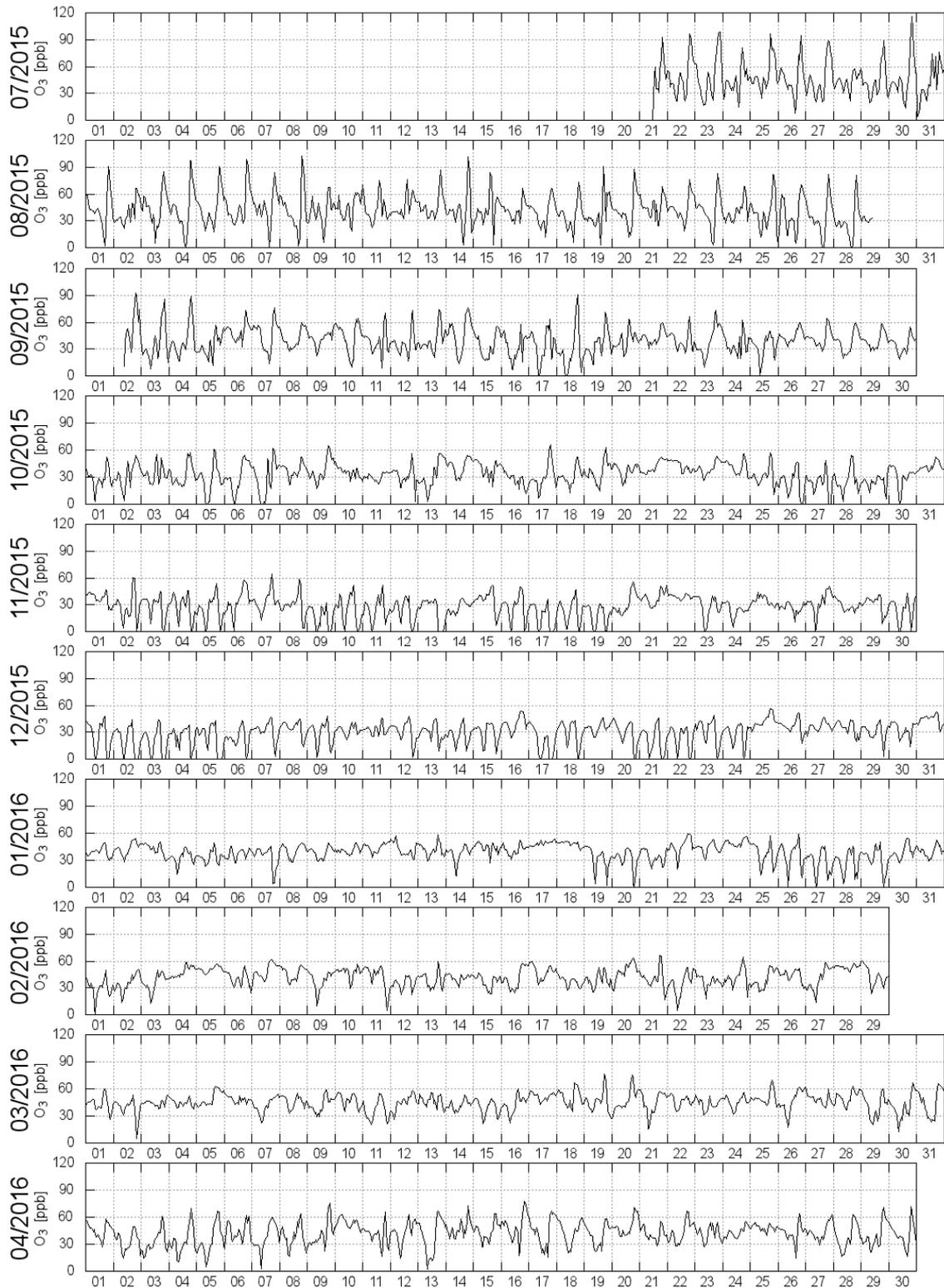
Monossido di Carbonio (CO)



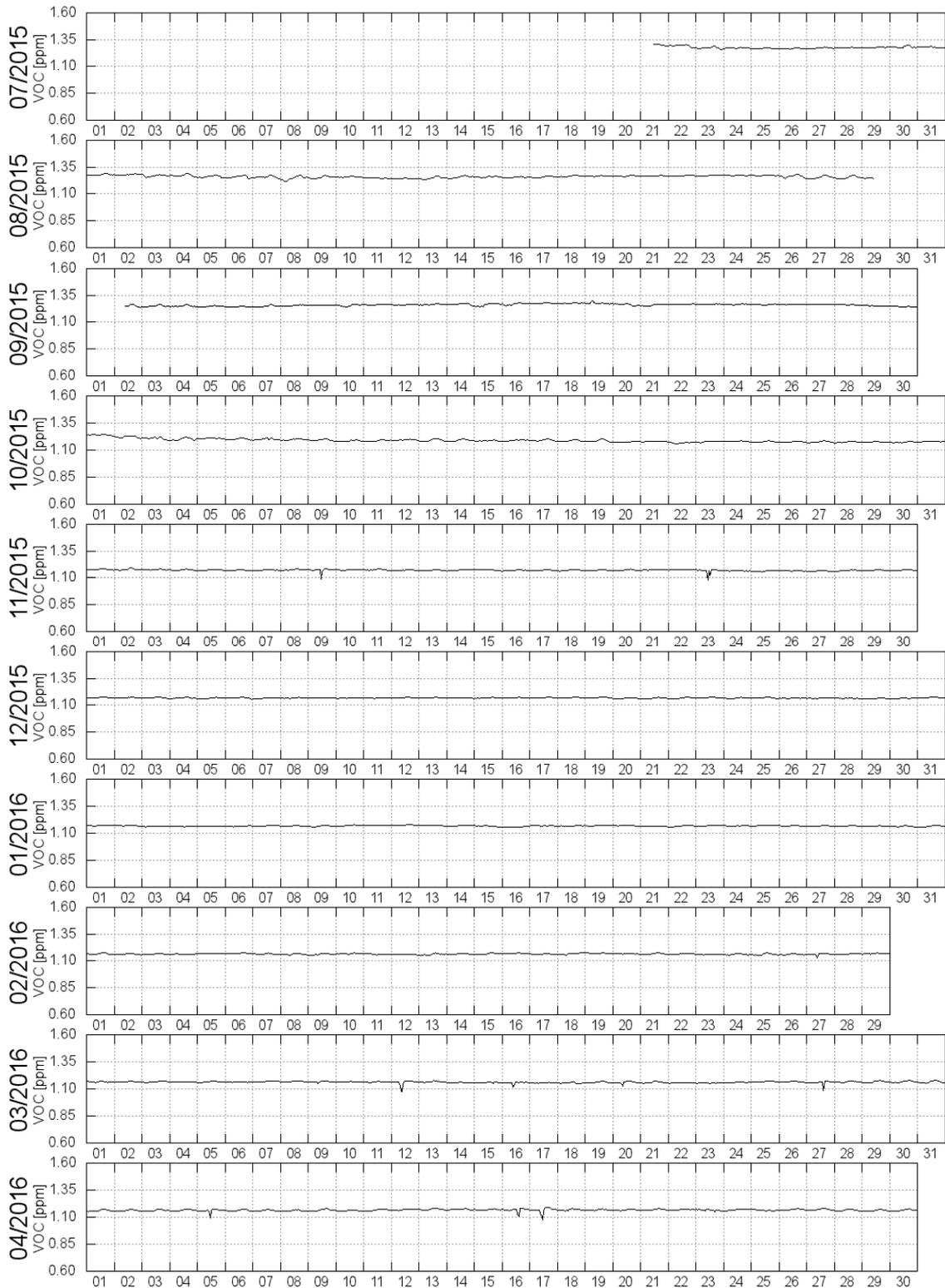
Biossido di Azoto (NO₂)



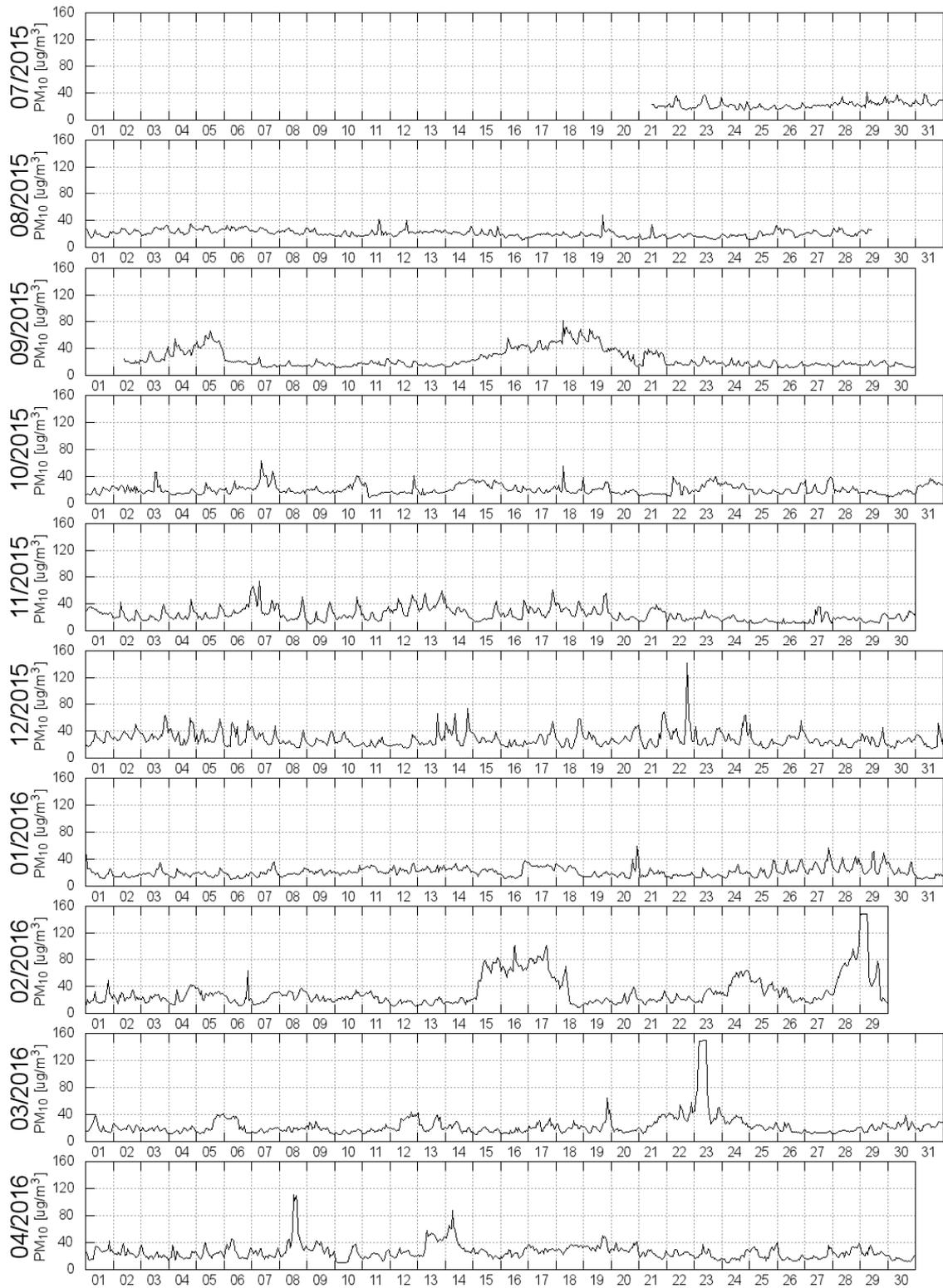
Ozono (O₃)



Composti Organici Volatili (VOC) Totali



Polveri Sottili (PM₁₀) con diametro aerodinamico inferiore a 10 μm



Bibliografia

- [1] M.I. Mead, O.A.M. Popoola, G.B. Stewart, P. Landshoff, M. Calleja, M. Hayes, J.J. Baldovi, M.W. McLeod, T.F. Hodgson, J. Dicks, A. Lewis, J. Cohen, R. Baron, J.R. Saffell, R.L. Jones, "The use of electrochemical sensors for monitoring urban air quality in low-cost, high-density networks", *Atmospheric Environment*, vol. 70, pp. 186-203, 2013.
- [2] B.C. Jaeschke, O.C. Lind, C. Bradshaw, B. Salbu, "On the feasibility of measuring urban air pollution by wireless distributed sensor networks", *Science of the Total Environment*, vol. 502, pp. 537-547, 2015.
- [3] C. Lin, J. Gillespie, M.D. Schuder, W. Duberstein, I.J. Beverland, M.R. Heal, "Evaluation and calibration of Aeroqual series 500 portable gas sensors for accurate measurement of ambient ozone and nitrogen dioxide", *Atmospheric Environment*, vol. 100, pp. 111-116, 2015.
- [4] S. De Vito, M. Piga, L. Martinotto, G. Di Francia, "CO, NO₂ and NO_x urban pollution monitoring with on-field calibrated electronic nose by automatic bayesian regularization", *Sensors and Actuators B*, vol. 143, pp. 182-191, 2009.
- [5] M. Bart, D. E. Williams, B. Ainslie, I. McKendry, J. Salmond, S. K. Grange, M. Alavi-Shoshtari, D. Steyn, G. S. Henshaw, "High Density Ozone Monitoring Using Gas Sensitive Semi-Conductor Sensors in the Lower Fraser Valley, British Columbia", *Environ. Sci. Technol.*, vol. 48, n. 7, pp. 3970-3977, 2014.
- [6] W. Tsujita, A. Yoshino, H. Ishida, T. Moriizumi, "Gas sensor network for air-pollution monitoring", *Sensors and Actuators B*, vol. 110, pp. 304-311, 2005.
- [7] <https://www.raspberrypi.org> (ultimo accesso: luglio 2016).
- [8] <http://www.debian.org> (ultimo accesso: luglio 2016).
- [9] <http://www.garr.it> (ultimo accesso: luglio 2016).
- [10] ARPA - Centro Regionale Aria - News, <http://arpacra.blogspot.it> (ultimo accesso: luglio 2016).
- [11] EuNetAir - European Network on New Sensing Technologies for Air Pollution Control and Environmental Sustainability, <http://www.cost.eunetair.it> (ultimo accesso: luglio 2016).
- [12] <http://www.alphasense.com/WEB1213/wp-content/uploads/2015/04/COB41.pdf> (ultimo accesso: luglio 2016).
- [13] <http://www.alphasense.com/WEB1213/wp-content/uploads/2015/03/NO-B4.pdf> (ultimo accesso: luglio 2016).
- [14] <http://www.alphasense.com/WEB1213/wp-content/uploads/2016/04/OX-B431.pdf> (ultimo accesso: luglio 2016).
- [15] <http://www.alphasense.com/WEB1213/wp-content/uploads/2014/08/SO2B4.pdf> (ultimo accesso: luglio 2016).

ENEA
Servizio Promozione e Comunicazione
www.enea.it

Stampa: Laboratorio Tecnografico ENEA - C.R. Frascati
agosto 2016