

Research & Experimentation

design

MONITORAGGIO PARTECIPATIVO DELL'ARIA URBANA CON APPARECCHI OPEN SOURCE

PARTICIPATIVE URBAN AIR QUALITY MONITORING USING OPEN SOURCE DEVICES

Maurizio Vrenna^a, Matthieu Crétier^b, Simon Nelson Landén^c

ABSTRACT

L'inquinamento atmosferico influisce negativamente sulla qualità della vita di miliardi di persone residenti in aree urbane. Gli attuali sistemi di monitoraggio restituiscono dati puntuali ma localizzati su mappe a griglia larga. Risulta quindi difficile per il cittadino e per le istituzioni avere piena consapevolezza della qualità dell'aria che respirano. L'articolo presenta la sperimentazione condotta da un gruppo di ricerca interdisciplinare, finalizzata alla realizzazione di un dispositivo compatto, economico e facilmente riproducibile, in grado di misurare gli inquinanti e riportarli in tempo reale su una mappa dettagliata e ad accesso libero. Il codice aperto e la versatilità del prodotto costituiscono la chiave per la sua diffusione e per contrastare l'inquinamento con un approccio partecipativo.

Air pollution negatively affects the life quality of billions of people living in urban areas. Current monitoring systems provide accurate data but this is distributed on large-scale grids. It is therefore difficult for citizens and institutions to be fully aware of the air quality in their area. The article presents an interdisciplinary research group's experimentation, aimed at creating a compact, economic, and easily reproducible device capable of measuring pollutants and reporting them in real-time on a detailed, free-access map. The openness of the code and the versatility of the product are the keys for its replicability and for tackling air pollution with a participatory approach.

KEYWORDS

inquinamento atmosferico urbano, dispositivi open source, monitoraggio partecipativo, piattaforma di condivisione, sensibilizzazione pubblica

urban air pollution, open source devices, participative monitoring, sharing platform, public awareness

Le rivoluzionarie scoperte del secolo scorso e i considerevoli sviluppi nel campo tecnico hanno portato a un positivo mutamento nelle abitudini di miliardi di persone. Al tempo stesso, in nome di un progresso miope e nel tentativo di ottenere facili profitti, sono state spesso giustificate azioni dannose per l'ecosistema naturale e, di riflesso, per l'uomo. Un cambio di paradigma, caratterizzato da azioni provenienti dai più svariati campi disciplinari è quindi di primaria necessità¹. È in questo contesto che il design può e deve farsi promotore di pratiche innovative, attraverso la progettazione di prodotti, servizi e sistemi, per il raggiungimento di un benessere condiviso². L'inquinamento atmosferico è solo uno dei problemi che attanagliano le società del terzo millennio. L'Organizzazione Mondiale della Sanità (2016), riferisce che gli inquinanti dell'aria siano responsabili per circa una morte su nove ogni anno. I costi economici, sociali e ambientali sono destinati a crescere nelle prossime decadi (EEA, 2018), mentre picchi di inquinamento sono sempre più comuni. Molte città sono vittime dello stesso problema, in Europa come in Asia, Africa e America (Fig. 1). Se si considerano inoltre l'espansione incontrollata delle aree urbane e la stima secondo cui il 66% della popolazione globale vivrà in insediamenti metropolitani entro il 2050 (United Nations, 2018), progetti e ricerche finalizzati a mitigare questo fenomeno sono estremamente attuali (Keivani, 2010).

Al fine di sviluppare soluzioni tecniche all'avanguardia, implementare politiche ambientali e indurre a cambi comportamentali, il monitoraggio dell'aria è di grande importanza. Al giorno d'oggi la qualità atmosferica viene rilevata attraverso stazioni di controllo operate da Enti ufficiali. Queste sono altamente affidabili e misurano un'ampia gamma di agenti inquinanti. Ciononostante, i considerevoli costi operativi ne limitano il numero, restituendo una mappa dell'inquinamento caratterizzata da una griglia a maglia larga (Carullo et alii, 2007). Questo paradigma sta cambiando e le più recenti ricerche sono indirizzate verso l'uso di stazioni mobili, l'ingegnerizzazione di dispositivi di monitoraggio intelligenti ed economici (Snyder et alii, 2013) e rilevamenti tramite smartphone (Hasenfratz et alii, 2012). Tuttavia questi tipi di sensori non hanno ancora raggiunto il loro potenziale di mercato (Lewis and Edwards, 2016). Un fenomeno emergente è il cosiddetto 'design aper-

to' che, sebbene non abbia una definizione univoca, può essere inteso come la «rivelazione gratuita di informazioni su un nuovo lavoro con l'intento di uno sviluppo collaborativo di un singolo progetto o di un numero limitato di progetti correlati per lo sfruttamento sul mercato o meno» (Raasch et alii, 2009, p. 383). Applicabile sia alla progettazione di software che di prodotto, il 'design aperto' ha già portato a risultati concreti e implementazioni di successo (Howard et alii, 2012), affrontando sfide significative nell'identificazione di modelli economici sostenibili, e che possano motivare i contributori (Bonvoisin and Boujut, 2015).

Il presente contributo illustra un esperimento condotto in un ambiente urbano che ha visto la prototipazione e prova di un innovativo apparecchio di rilevamento dell'aria. Il dispositivo è stato ideato tenendo in considerazione gli elementi della collaborazione aperta, tra cui l'accesso libero alla contribuzione e fruizione dei contenuti e lo scambio di informazioni tra partecipanti (Levine and Prietula, 2014). La sperimentazione si colloca nel campo del design di prodotto, con particolare attenzione allo sviluppo in parallelo di uno scenario che possa favorire la costruzione di comunità consapevoli che possano prendere decisioni con fermezza (regolamentazione del traffico, costruzione di aree pedonali e piste ciclabili, efficientamento energetico degli edifici pubblici e/o privati, politiche sulla sanità pubblica, ma anche abitudini di acquisto e consumo, etc.)³. L'articolo è rivolto a ricercatori nel campo del design e dell'ingegneria, istituzioni pubbliche e private, imprenditori che desiderano investigare modelli di impresa alternativi ma anche, e soprattutto, a cittadini interessati a contribuire alla risoluzione di un problema così difficile da contrastare.

Contesto del progetto e fasi della sperimentazione

La ricerca è nata all'interno di un programma di formazione congiunto fra Politecnico di Torino, Collège des Ingénieurs Italia e CERN IdeaSquare⁴. Il progetto è stato condotto da un gruppo di studenti di dottorato e MBA (Fig. 2) provenienti dai campi del design, dell'ingegneria e dell'economia in risposta alla sfida lanciata dalla Municipalità di Torino, per l'adozione di sensoristica che potesse sfruttare le nuove reti di comunicazione 5G⁵. Una commissione di esperti⁶ lo ha selezionato come vincitore dell'edizione 2018 sulla base del potenziale impatto sulla comunità locale⁷. Il progetto si confi-

gura attorno a due elementi, ovvero un dispositivo di rilevamento dei particolati, autoprodotta e programmata con codice open source e una piattaforma online attraverso la quale consultare i dati, ottenuti tramite un processo di monitoraggio partecipativo. I dati consentirebbero ai cittadini di essere sempre aggiornati, mentre sarebbero di supporto alle municipalità per decisioni complesse sotto condizioni critiche, come i picchi di inquinamento. L'apertura alla collettività è una peculiarità del progetto. Il coinvolgimento di un ampio numero di fruitori renderebbe infatti più trasparente ed efficiente il processo di acquisizione ed elaborazione delle misurazioni. Data l'originaria natura imprenditoriale, è stato anche ipotizzato un modello di sostenibilità economica e sociale che stimolasse la partecipazione alla piattaforma.

L'approccio sperimentale ha avuto sin da subito uno stampo pratico-operativo. Dopo una prima fase di ricerca, è stata elaborata una visione complessiva del progetto. Ha fatto seguito la prototipazione del dispositivo e della mappa. Le funzioni dei prototipi sono state validate in occasione di una fiera aperta a startup, artigiani, studenti e cittadini⁸. I riscontri ottenuti sono serviti al miglioramento delle prime versioni, che risultavano ancora immature. Un modello aggiornato dell'apparecchio è stato, quindi, riprodotto in cinque esemplari, che sono stati successivamente collocati in aree critiche di Torino. L'installazione è servita a verificare il grado di interesse di coloro che si sono resi disponibili alla collaborazione e per collezionare una serie di dati. Infine, i risultati sono stati normalizzati, ricampionati e analizzati. La sperimentazione si è articolata per un periodo di 11 mesi, con fasi di lavoro più o meno intense (Fig. 3).

L'apparecchio di monitoraggio autoprodotta – Progettato per essere di facile utilizzo e collocabile sia in uno spazio domestico che pubblico, il dispositivo si integra con la piattaforma di visualizzazione dati fornendo valore aggiunto all'intero progetto. Per la sua realizzazione sono state adottate le linee guida del design aperto, garantendo processi e sorgenti degli output accessibili e (ri)utilizzabili, da ognuno e per qualsiasi scopo (Boisseau et alii, 2018). Lo sviluppo si è articolato in quattro fasi: ideazione, prototipazione, assemblaggio e riproduzione, test. Durante la fase di ideazione, sono stati definiti i vincoli progettuali. I requisiti presi in considerazione sono stati il costo complessivo contenuto, la reperibilità dei componenti, la facilità di montaggio, le ridotte dimensioni, l'affidabilità. Queste caratteristiche sono decisive per garantire un'ampia diffusione: l'intera piattaforma guadagna infatti efficacia all'aumentare dei sensori funzionanti, permettendo un'elevata granularità delle misurazioni.

Dopodiché, si è proceduto con la selezione delle componenti per la prototipazione. La componentistica utilizzata non è avanguardistica e ciò ne ha permesso un facile acquisto online. Ogni dispositivo include: n. 1 Arduino Pro Mini, n. 1 sensore di rilevamento particolati⁹, n. 1 microSD da 16 GB, n. 1 supporto per scheda SD, n. 1 Real-Time Clock (RTC), n. 1 pila a bottone, n. 1 batteria al litio ricaricabile da 3,7V, n. 1 regolatore di voltaggio, n. 1 breadboard, cavi di connessione, guscio esterno. Il costo complessivo è stato di circa euro 60,00, quindi relativamente accessibile. Il funzionamento dell'apparecchio risulta essere piuttosto



Fig. 1 - Air pollution over the city of Turin (credit: F. Lamma, 2017).

Fig. 2 - The group of PhD and MBA students. From the left: R. Pietrobon, M. Vrenna, J. Shan, A. Siciliani, F. Fontana and M. Crétier.

semplice. Il sensore raccoglie i dati, questi vengono inviati alla scheda Arduino che li elabora e li trasmette alla microSD per la scrittura. L'orologio, alimentato dalla pila a bottone, tiene traccia dell'ora e permette di programmare l'azione del sensore e della batteria ad intervalli regolari. La batteria al litio fornisce energia solamente quando azionata. Il regolatore di voltaggio trasforma la tensione di 3,7V in uscita delle batterie in 5V, come da specifica di Arduino (Fig. 4).

Una versione preliminare del dispositivo ha previsto la modellazione e stampa in 3D (Fig. 5) di un involucro esterno. Il sensore così assemblato (Figg. 6, 7) è stato validato (Fig. 8) e in seguito presentato durante la giornata conclusiva del programma I4C (Fig. 9). Un secondo prototipo, utilizzato per la fase di test, ha invece visto l'adozione di un comune contenitore in plastica rigida. Questa scelta ha permesso di abbassare i costi e ridurre i tempi di riproduzione, a discapito di un maggiore dimensionamento¹⁰. Per assemblare i dispositivi sono state consultate diverse guide online: i pin sono stati saldati, mentre altre componenti fissate con nastro adesivo. La batteria al litio è stata isolata con poliuretano espanso, nel tentativo di ottimizzarne la durata (Fig. 10). Per l'assemblaggio di ogni dispositivo ci è voluta circa un'ora e mezza. Gli apparecchi si sono rivelati semplici da riprodurre e soprattutto affidabili. Si suppone che anche un pubblico inesperto sarebbe in grado di costruirli seguendo basilari istruzioni e ci si auspica che la comunità intervenga nel loro miglioramento.

La mappa – La visualizzazione spaziale e temporale dei dati è un tema attuale. Le rappresentazioni grafiche permettono di comunicare informazioni complesse con chiarezza e precisione, incoraggiando alla comparazione e rivelando le loro qualità intrinseche (Tuft, 2001). La mappa, che consente la consultazione dei dati sugli inquinanti, è

stata creata servendosi di R, un linguaggio di programmazione e un ambiente di sviluppo per l'analisi statistica. Questa scelta è stata dettata dalla licenza open source e la presenza di librerie per l'analisi e la visualizzazione di dati quali shiny, leaflet e ggplot2¹¹. Particolare attenzione è stata rivolta alla tecnologia modulare ed a processi d'integrazione semplici: questi sono tratti fondamentali affinché lo sviluppo di un progetto open source veda la partecipazione ed il contributo di quanti più esperti e interessati (Bonvoisin and Boujut, 2015).

La mappa si dimostra di facile fruizione e univoca comprensione (Fig. 11). L'utilizzo dell'interfaccia grafica è stato influenzato dalle metriche selezionate e applicate, in fase di prima analisi, nella classificazione delle criticità che contraddistinguono i sistemi di monitoraggio ad oggi disponibili. Quindi una maggiore rilevanza è stata data alla granularità delle misurazioni, alla loro frequenza di campionamento e alla loro accessibilità. La mappa è stata sviluppata su di una griglia, le cui celle hanno una dimensione di 500 metri per lato. Ciò permette di aggregare campionamenti fatti in aree adiacenti, interpolare i loro valori e ovviare all'errore della singola misurazione. Attraverso questo approccio a supporto di una popolazione di sensori collocati sull'intera area comunale, si otterrebbe un reticolato composto da 520 celle. In confronto alle cinque stazioni di rilevamento operate dall'ARPA, si potrebbe ottenere una griglia fino a 100 volte più densa.¹²

Programmazione open source – Il software è stato sviluppato utilizzando un popolare sistema open source basato su Git¹³. Si è inizialmente selezionato il servizio di hosting Bitbucket per la possibilità di avere una banca dati privata e gratuita¹⁴. L'intenzione prossima è di archiviare i valori raccolti su una repository pubblica, rendendoli completamente accessibili. Poiché si è scelto Arduino come piattaforma integrata, per la scrittura del codice ci si è serviti unicamente del suo Ambiente di Sviluppo Integrato (Arduino IDE)¹⁵. Le librerie standard di Arduino sono state utilizzate per importare i dati sulla scheda SD attraverso protocollo SPI (Serial Peripheral Interface) e per la comunicazione con il circuito RTC per mezzo del protocollo I2C (Inter-Integrated Circuit). Sono state usate anche un paio di librerie di terze parti: Low-Power di Rocket Scream Electronics per ridurre il consumo energetico del dispositivo e RTCLib di Adafruit per semplificare l'installazione del circuito RTC¹⁶. Una libreria specifica per il misuratore di PM2,5 è stata sviluppata per tradurre le misurazioni in valori facilmente utilizzabili.

Il perfezionamento del software sarà necessario in una fase più matura del progetto. Attualmente la modalità a risparmio energetico ha incrementato il periodo di funzionamento del dispositivo; tuttavia, come si è evinto dalla fase di test, il tempo non è stato quello desiderato. Si potrebbe intervenire a livello hardware con l'integrazione di celle fotovoltaiche a supporto della batteria. Al tempo stesso, ottimizzare a livello software il rapporto tra fasi di misurazione e standby. Una corretta ottimizzazione di queste componenti potrebbe rendere il sistema autosufficiente in termini di consumo energetico. La registrazione dei dati in cloud, anziché in locale, imporrà nuovi requisiti alla programmazione. Si ipotizza, inoltre, lo sviluppo futuro di un algoritmo per migliorare l'accu-

ratezza del sistema e di reti neurali per un'analisi efficace delle misurazioni.

Monitoraggio partecipativo e analisi dei dati – Un test pilota è stato svolto al fine di verificare il funzionamento dei dispositivi. Sono stati installati 5 sensori in altrettanti siti (Fig. 12), attraverso il coinvolgimento di privati cittadini rivelatisi ben lieti di poter contribuire al progetto. Sono stati selezionati balconi nel centro città o nelle immediate vicinanze (Fig. 13), per raccogliere misurazioni in aree con caratteristiche differenti (strade trafficate, interno via, cortili, piani bassi o alti, ecc.). Il monitoraggio è iniziato il 13 dicembre 2018 e si è concluso il 13 gennaio 2019.

I sensori sono stati programmati per acquisire una misurazione ogni 40 minuti. A causa delle basse temperature invernali, la carica di alcune batterie si è esaurita prima del previsto. Lo studio dei dati, effettuata da un esperto analista¹⁷, ha quindi tenuto conto delle misurazioni raccolte da 3 dei 5 sensori, dal 13 al 20 dicembre. Benché ogni apparecchio fosse stato predisposto con un orologio, si è dimostrata necessaria la sincronizzazione delle misurazioni di PM_{2,5} per la loro comparazione. L'unità di misura dell'inquinante è stata convertita da particolati/m³ a µg/m³, ovvero l'unità convenzionale per il particolato sottile. Non sono stati presi in considerazione altri indici quali American Air Quality Index (AQI), Atmos o Indice di Qualità dell'Aria (IQA) in quanto aggregatori di inquinanti diversi, la cui efficacia è stata più volte discussa dalla comunità scientifica internazionale (Franceschini et alii, 2005, p. 502). Successivamente è stata calcolata la media delle concentrazioni di PM_{2,5} per ottenere una stima del loro andamento (Fig. 14). Infine, sono stati estratti i valori medi e la deviazione standard giornaliera per ogni sensore (Fig. 15), al fine di verificare la varianza nelle misurazioni e la loro consistenza (si assume che dispositivi vicini tra loro abbiano valori simili).

Dai dati è emerso che la concentrazione di particolato sottile è stata mediamente elevata. Vi sono stati dei picchi in concomitanza della giornata del 16 dicembre, come riportato dalla Municipalità di Torino¹⁸. I dati raccolti hanno condotto a risultati soddisfacenti e in linea con le aspettative e sono stati condivisi con i partecipanti. Sebbene alcuni campionamenti presentino una varianza accentuata, complessivamente il sensore si è dimostrato affidabile. Un secondo periodo di rilevamento è previsto per l'estate del 2019, con lo scopo di testare il modulo per la connettività e l'analisi dati in tempo reale.

Limiti e implicazioni socio-economiche – La produzione e diffusione di un dispositivo di questo tipo non permettono certamente l'immediata riduzione dei livelli di inquinamento. La collezione, l'impiego ma soprattutto un'analisi meticolosa dei dati – definiti da Humby (2016, p. 13) come il «nuovo petrolio» e motore dell'industria e della società moderna – sono da intendersi di supporto nel miglioramento di soluzioni di carattere tecnico e legislativo, in continua elaborazione. La mancanza di dati oggettivi e qualitativi potrebbe, infatti, portare a intraprendere decisioni errate e, in alcuni casi, controproducenti.

Il progetto è stato in grado di dimostrare che è possibile autoprodotte dei dispositivi di controllo

degli inquinanti, che restituiscono dati affidabili con una modesta densità spaziale. Ciononostante sarebbe opportuno testare l'affidabilità dei sensori nel medio-lungo termine. Rilevamenti in altre zone urbane potrebbero dimostrarsi utili. La qualità del guscio esterno potrebbe essere migliorata, per garantire una maggiore protezione da urti e agenti atmosferici e fornire isolamento termico, così come l'interazione uomo-dispositivo che, ad oggi, non è immediata. Si potrebbe inoltre lavorare sulla riduzione del costo totale: la sostituzione della scheda programmabile Arduino in favore di una scheda pre-programmata potrebbe essere una soluzione perseguibile, a scapito però di una grande versatilità d'uso. Anche la mappa necessiterebbe di un'ottimizzazione della sua fruizione che, ad oggi, è possibile solamente tramite un programma per computer dedicato.

Infine, la produzione in autonomia dell'apparecchio potrebbe risultare difficile per alcuni, ostacolando una sua rapida diffusione. È quindi di sostanziale importanza formare i cittadini incrementando la comunicazione, la visibilità del progetto online, il passaparola e la presenza a fiere ed eventi pubblici. Pur mantenendo saldi i principi di collaborazione aperta si potrebbero, per giunta, rifinire modelli di impresa e partenariato con aziende e istituzioni, che assumerebbero un ruolo chiave per la promozione e l'acquisizione di un bacino di partecipanti-fruitori allargato.

Considerazioni, stato attuale e sviluppi futuri – Si parla sovente dell'inquinamento atmosferico e delle sue cause senza tenere in considerazione che esso dipende, indirettamente, da comportamenti e scelte quotidiane personali. Prediligere l'uso di mezzi di trasporto pubblico, l'installazione di caldaie più efficienti, ma anche il consumo di cibo stagionale e l'acquisto responsabile di prodotti locali, porterebbe ad una considerevole riduzione delle emissioni. La partecipazione attiva nel monitoraggio dell'aria diventerebbe quindi il volano per la diffusione della consapevolezza su questo tema. I cittadini verrebbero educati 'dal basso' e contribuirebbero a fornire dati significativi per le municipalità, utili a combattere l'inquinamento dell'aria con rigore scientifico e cognizione di causa. La resa delle informazioni al pubblico, lo sviluppo di strategie d'azione a livello locale e la valutazione delle fonti di inquinamento, rafforzerebbero il piano per garantire che gli stessi standard vengano rispettati.

Ricerche e sperimentazioni nel campo della progettazione di prodotti in grado di influire positivamente sul tenore della vita di molti, sono

senza dubbio di attualità e di particolare rilevanza. L'apporto multidisciplinare di designer, ingegneri, economisti e programmatori che hanno partecipato a questo progetto è stato certamente un elemento di forza. La collaborazione ha funzionato perché il gruppo è stato in grado di anteporre una struttura di pensiero portante al di sopra dei saperi specialistici, in una prospettiva di contaminazione e azione congiunta. Un livello chiaro di comunicazione e, in alcuni frangenti un sano grado di disaccordo, hanno contribuito al reciproco riconoscimento delle specifiche competenze professionali e personali. Questo metodo di progettazione e ricerca aperto, che integra diverse materie, è «condizione preliminare per modalità di indagine continue, collaborative e sociali che sono indispensabili» (Thackara, 2011, p. 42) e dovrebbe essere adottato più frequentemente sia nella ricerca che nella pratica.

Il gruppo di lavoro sta ora studiando una versione aggiornata del dispositivo, nell'ottica di avviare una nuova fase di test. Al contempo si sta occupando della creazione di documentazione (istruzioni all'autoprodotto e codice di programmazione ottimizzabile da terzi) disponibile gratuitamente al download da un sito internet dedicato, dal quale sarà anche possibile consultare la mappa perfezionata. Ulteriormente si stanno conducendo delle interviste alle persone che hanno aderito al monitoraggio, per capire come migliorare l'esperienza d'uso e le leve su cui insistere per garantire una più vasta adesione al network. Nonostante la sperimentazione in fieri e i limiti tecnici ed economici presentatisi, questo prodotto rappresenta un contributo accademico e pratico rimarchevole, che mira a essere di riferimento per successive ricerche e che ha già suscitato l'interesse della Municipalità di Torino. In un prossimo futuro ci si focalizzerà sul raggiungimento di una maggiore partecipazione pubblica. La volontà di agire e la presa di coscienza sono imperativi e dovrebbero venire prima di qualsiasi altra soluzione di tipo tecnico (Fig. 16).

ENGLISH

The last century's revolutionary discoveries and outstanding technical developments have led to positive changes in the habits of billions of people. At the same time, a short-sighted view of progress and an attempt to obtain easy profit, have often justified harmful actions for the natural ecosystems and, consequently, for man. A change of paradigm, characterized by targeted actions from a wide variety of disciplinary fields, is therefore of primary necessity¹. It is in this context that design

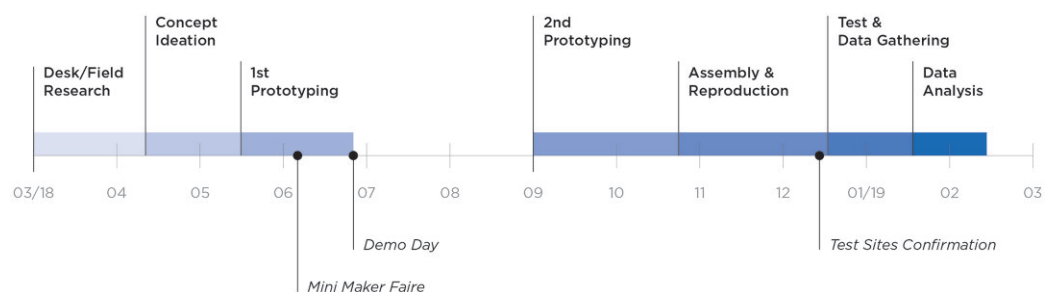


Fig. 3 - Chronology and phases of the experimentation, from March 2018 to March 2019.

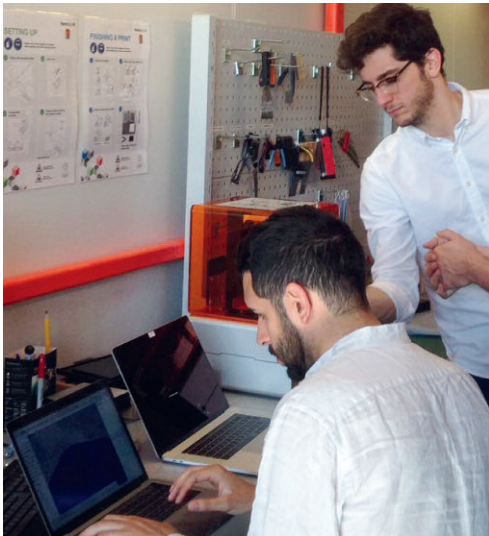
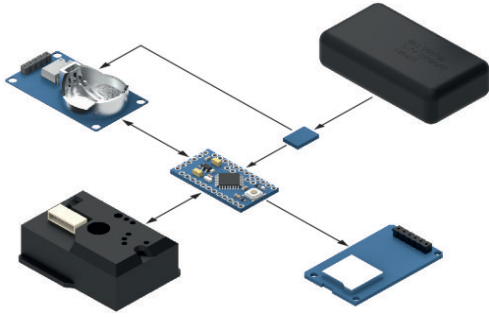


Fig. 4 - Schema of the interactions between the components of the device.

Fig. 5 - The working group while 3D modeling and printing the outer shell at CERN IdeaSquare.

must grasp the possibility of becoming a promoter of innovative practices, through the design of products, services and systems, to achieve shared well-being². Air pollution is one of the main problems afflicting societies of the third millennium. The World Health Organization (2016), has reported that air pollutants are responsible for about one in nine deaths every year. Economic, social, and environmental costs are destined to surge in the upcoming decades (EEA, 2018), while pollution peaks are becoming increasingly common. Many cities are a victim of the same problem, in Europe, as in Asia, Africa and America (Fig. 1). Considering the unprecedented urban sprawl, with an estimated 66% of the world population that will be living in metropolitan areas by 2050 (United Nations, 2018), projects and research aimed at mitigating this phenomenon are extremely relevant (Keivani, 2010).

In order to develop cutting-edge technical solutions, to put environmental policies into practice, and to induce behavioral changes, air monitoring is of utmost importance. Nowadays, air quality is detected by stations operated by official Bodies. These are highly reliable and can measure a wide range of pollutants. Nonetheless, the substantial operative costs limit their number, resulting in pollution maps with large-scale grids (Carullo et alii, 2007). This paradigm is changing and the most recent research is directed toward the use of mobile stations, the engineering of smarter and cheaper sensing devices (Snyder et alii, 2013) and measurements through smartphones

(Hasenfratz et alii, 2012). In spite of this, these kinds of sensors have not yet achieved their market potential (Lewis and Edwards, 2016). An emerging phenomenon is the so-called 'open design'. Even though it does not have a broadly accepted definition, it can be intended as the «free revealing of information on a new design with the intention of collaborative development of a single design or a limited number of related designs for market or non-market exploitation» (Raasch et alii, 2009, p. 383). Open design is applicable to both software and product design and has already led to concrete results and successful implementations (Howard et alii, 2012). Nevertheless, it faces significant challenges in identifying sustainable economic models that could motivate contributors (Bonvoisin and Boujut, 2015).

This contribution presents an experiment conducted in an urban environment that involved the prototyping and testing of an innovative air quality detection instrument. The device was conceived by taking into account the elements of the open collaboration, including the free access to the contribution and use of contents, and the exchange of information between participants (Levine and Prietula, 2014). This experimentation takes place in the field of product design. Particular attention has been paid to the parallel development of a scenario that could facilitate the construction of self-aware communities, able to take purposeful decisions (traffic regulation, construction of pedestrian areas and cycle paths, energy-efficient public and/or private buildings, public health policies, but also purchasing and consumption habits, etc.)³. The article is addressed to researchers in the fields of design and engineering, public and private institutions, entrepreneurs who wish to investigate alternative business models but also, and above all, to concerned citizens who want to contribute to the resolution of a complex problem.

Project context and phases of the experimentation – The research began within a learning program jointly developed by Politecnico di Torino, Collège des Ingénieurs Italia, and CERN IdeaSquare⁴. The project was carried out by a group of PhD and MBA students (Fig. 2) from the fields of design, engineering and economics in response to a challenge launched by the Municipality of Turin. This challenge called for innovative sensor solutions that could exploit the new 5G communication network⁵. A panel of experts⁶ selected the project as the winner of the 2018 edition, based on its positive potential impact on the local community⁷. The project is based on two elements. Firstly, a detection device, self-produced and programmed with open source code, capable of measuring the concentrations of particulate matter. Then, an online platform to consult data, obtained through a participatory monitoring process. The collected data allow citizens to be constantly updated, while supporting municipalities for complex decision making under critical conditions, such as pollution peaks. The openness to the community is a distinctive aspect of the project. The involvement of a large number of users would make the acquisition and the processing of data more transparent and efficient. Given the original business nature of the project, an executive social model has been hypothesized to stimulate participation on the platform.

The experimentation had a practical-operational approach from the outset. After a first research phase, an overall vision of the project was conceptualized. The prototyping of both the device and the map then followed. The functions of the first versions were validated at a design fair addressed to startups, craftspeople, students, and other citizens⁸. The feedback obtained contributed to improving the prototypes, which were still imperfect. An updated model of the device was reproduced in five samples, which were subsequently placed in critical areas of the city of Turin. The installation allowed the degree of interest of those who collaborated to be verified and a series of data to be collected. Finally, the acquired results were normalized, resampled and examined. The experimentation took about 11 months, with work phases of varying degrees of intensity (Fig. 3).

The self-produced monitoring device – Designed to be easy-to-use and suitable for both domestic and public spaces, the device integrates with the visualization platform providing added value to the entire project. The guidelines of open design have been taken into consideration for its development, guaranteeing that the process and the sources of its output are accessible and (re)usable, by anyone and for any purpose (Boisseau et alii, 2018). The product was developed following four phases: design, prototyping, assembly and reproduction, testing. During the design phase, the constraints were defined. The main requirements were the overall low cost, the availability of the components, the ease of assembly, the small size, its reliability. These characteristics are fundamental for guaranteeing its maximum propagation: in fact, the whole platform gains effectiveness with an increasing number of operating sensors, allowing measurements with high granularity to be obtained.

Following the first ideation phase, the components for the prototypes were selected. The technological parts used are not avant-garde. For this reason, they were extremely easy to buy online. Each device includes: n. 1 Arduino Pro Mini, n. 1 fine particle detection sensor⁹, n. 1 16 GB microSD, n. 1 SD card holder, n. 1 Real-Time Clock (RTC), n. 1 button cell, n. 1 3.7V rechargeable lithium battery, n. 1 voltage regulator, n. 1 breadboard, several connection cables, outer shell. The total cost for the various parts was approximately euro 60.00, therefore relatively accessible. The operational schema of the device is quite simple. The sensor collects data, these are sent to the Arduino board, which processes and transmits them to the microSD for writing. The clock, powered by the button cell, keeps track of the current time and allows programming of the activation of the sensor and of the battery at regular intervals. The lithium battery supplies power only when activated. The voltage regulator is used to transform the 3.7V output voltage of the batteries into 5V, as per the Arduino specification (Fig. 4).

A preliminary version of the device involved the 3D modeling and printing (Fig. 5) of an external casing. The assembled sensor (Figs. 6, 7) was validated (Fig. 8) and subsequently presented during the final day of the I4C program (Fig. 9). For the assembly of a second prototype, used for the test phase, a common hard plastic container was employed. This choice made it possible to lower costs and reduce reproduction times, at the

expense of larger dimensions¹⁰. Several online guides were consulted to assemble the devices: the pins were welded, while an adhesive tape was used to fix other components. The lithium battery was insulated with expanded polyurethane, in an attempt to optimize its duration (Fig. 10). It took about an hour and a half for the assembly of each device. The sensors were easy to reproduce but above all reliable. Even an inexperienced person should be able to build them with the support of basic instructions. The community will hopefully contribute to their improvement.

The map – Space-time data visualization is a current topic. The graphic representations allow to communicate complex information with clarity and precision and encourage to compare and reveal their intrinsic qualities (Tufte, 2001). The map, that allows the consultation of pollutant data, was created by using R, a programming language and a specific development environment for statistical analysis. The open source license and the presence of optimized libraries for the analysis and display of data such as shiny, leaflet and ggplot2¹¹ dictated its choice. Particular attention was paid to modular technology and to simple integration processes. These are fundamental features to guarantee successful completion of such an open source project and to see the participation and contribution of experts and passionate people (Bonvoisin and Boujut, 2015).

The map is easy to use and of unambiguous understanding (Fig. 11). The metrics selected and applied in the first analysis, when the critical issues of the contemporary air pollution visualization systems available today have been classified, influenced the use of this graphical interface. Therefore, greater importance was paid to the granularity of the measurements, their sampling frequency, and their overall accessibility. The map was developed on a grid, whose cells base have a size of m 500 per side. This permits the aggregation of samples taken in adjoining areas, interpolate their values, and overcome the single measurement error. Through this approach and with a supportive population of sensors on the entire municipality, would result in a grid of 520 cells. Compared to the five monitoring stations operated by ARPA, it could be possible to obtain a grid up to 100 times denser.¹²

Open source programming – The software was developed using a popular, open source and Git-based version control system¹³. Bitbucket hosting service was initially selected for the possibility of having a private and free repository¹⁴. The future plan is to store the collected data in a public database, making it completely accessible for anyone. Since Arduino was chosen as a platform, the code was developed solely through its Integrated Development Environment (Arduino IDE)¹⁵. Arduino standard libraries were used for writing the data on the SD card through the SPI protocol (Serial Peripheral Interface), and for communication with the RTC circuit by means of the I2C protocol (Inter-Integrated Circuit). A couple of third-party libraries have also been used: Low-Power by Rocket Scream Electronics to reduce the power consumption of the device, and RTCLib by Adafruit to simplify the usage of the RTC circuit¹⁶. A specific library for the PM2.5 sensor was developed

in order to translate the measurements into values that could be easily interpreted.

Further development of the software will be necessary for a more mature phase of the project. Currently, the energy-saving mode has increased the operation time of the device. However, as seen from the test phase, the period was not the one desired. It is possible to improve the system at the hardware level by complementing the battery with a photovoltaic cell, as well as to optimize the sleep-to-measurement ratio at the software level. Optimizing the above in the correct way could possibly make the system self-sustainable in terms of energy consumption. Saving data to the cloud, rather than locally, will impose new requirements on the whole system. Future development will take into account an algorithm able to improve the accuracy of the system and possibly a neural network for a more efficient analysis of the measurements.

Participatory monitoring and data analysis – A pilot test was carried out in order to verify the functioning of the devices. Five sensors were installed in as many sites (Fig. 12), through the involvement of private citizens that were glad to support the project. Balconies have been selected in the city center or in its immediate vicinity (Fig. 13), in order to collect measurements in areas with different characteristics (busy streets, private roads, courtyards, low or high floors, etc.). Monitoring started on December 13, 2018 and ended on January 13, 2019.

The sensors were programmed and synchronized to acquire a measurement every 40 minutes. Due to the low temperatures of the winter period, some of the batteries ran out of power earlier than expected. Therefore, the data analyzed by an expert analyst¹⁷ only studied the measurements collected from 3 of the 5 sensors, from December 13 to December 20. Even though each device was set up with a clock, the synchronization of PM2.5 measurements was necessary to compare them. The unit of measurement of the pollutant was converted from particulates/m³ to µg/m³, corresponding to the conventional unit for fine particulate matter. Other indexes such as American Air Quality Index (AQI), Atmos or Air Quality Index (IQA) were not taken into consideration as they are aggregators of different pollutants, whose effectiveness has been repeatedly discussed by the international scientific community (Franceschini et alii, 2005, p. 502). Subsequently, the mean PM2.5 concentrations were calculated, to obtain an estimate of their trend (Fig. 14). Finally, the average values and the daily standard deviation of the change in PM2.5 for each sensor were extracted (Fig. 15), in order to verify the variance in the measurements and their consistency (it is assumed that relatively near devices have similar values).

Data showed that the concentration of fine particulate matter was high. There were peaks on December 16, as reported by the Municipality of Turin¹⁸. The information collected led to satisfactory results in line with the expectations and was shared with the participants. Although some samples show a noticeable variance, the self-produced sensor has proved to be overall reliable. A second data collection period is scheduled for the summer of 2019, with the aim of testing connectivity and the real-time data analysis.

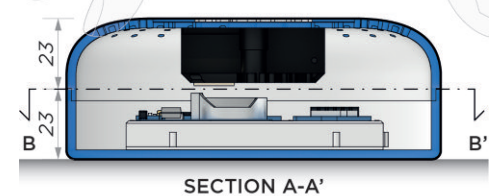
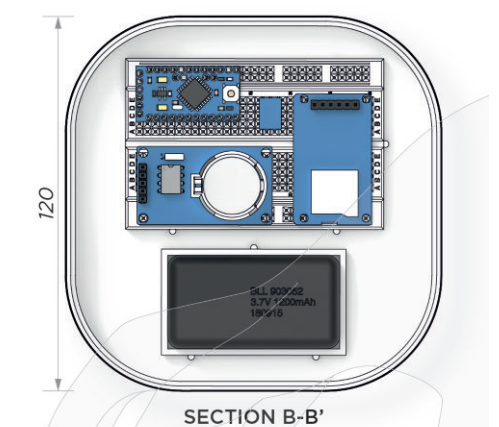
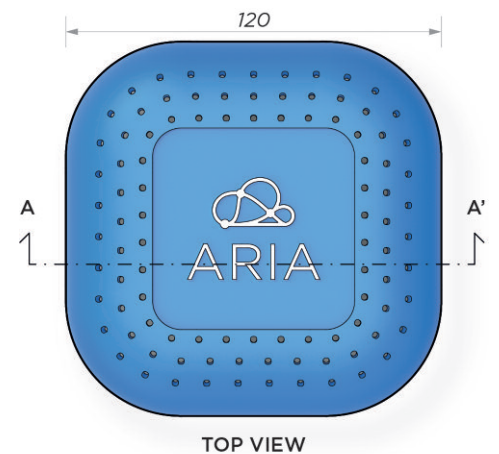
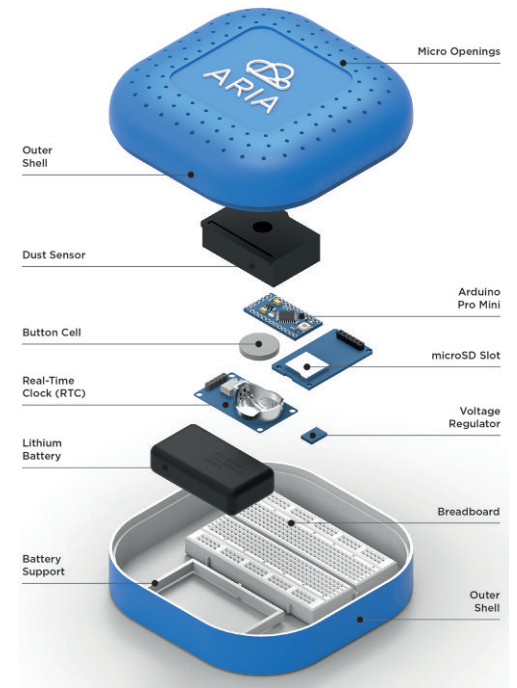


Fig. 6, 7 - The Device: Axonometric exploded view; Main dimensions and sections (quotes in mm).

Limits and socio-economic implications – The production and the distribution of a similar device certainly do not allow the immediate reduction of pollution levels. The collection, the employment and the meticulous analysis of the data – defined by Humby (2016, p. 13) as the «new oil» and engine of industry and of modern society – instead support the improvement of technical and legislative solutions. In fact, the lack of objective and qualitative data could lead to erroneous and, in some cases, even counterproductive decisions.

The project was able to demonstrate that it is possible to self-produce air pollution sensors which provide reliable data with a modest spatial density. Nevertheless, it would be appropriate to test the reliability of the sensors in the medium-long term. Collection of data in other urban areas could be valuable as well. The quality of the outer shell could also be improved, to ensure greater

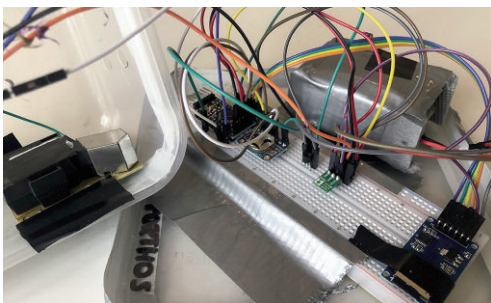


Fig. 8 - Receiving valuable feedbacks during the Mini Maker Faire.

Fig. 9 - The device presented at Demo Day.

Fig. 10 - Assembly phase of one sensor used for the test.

protection against bumps and atmospheric agents, and to provide thermal insulation. Human-computer interaction is still not immediate and deserves an enhancement. The total cost of the device may be lowered too: replacing the Arduino programmable card in favor of a pre-programmed board could be a viable solution, although to the detriment of greater versatility of use. As regards the visualization, the map would need further refinements of the user interface to optimize its use. Currently, this is possible only through a dedicated computer program.

Finally, the autonomous production of the device may be difficult for some people, impeding its rapid propagation. It is therefore of great importance to increase the visibility of the project, train citizens and raise awareness through online communication, by word of mouth, and the presence at public fairs and events. While maintaining the principles of open collaboration, it would also be possible to refine the business models and the partnerships with companies and institutions, which would take on a key role in the promotion and acquisition of an extended pool of participants-users.

Considerations, current status and future developments – We often discuss air pollution and its causes without taking into account that it indirectly depends on people's behavior and individuals' daily choices. The use of public transportation, the installation of more efficient water-heaters, but also the consumption of seasonal food and the responsible purchase of local products, would lead to a considerable reduction of emissions. The active participation in air monitoring could become the driving force for raising awareness about this issue. In this case, citizens would receive a 'bottom-up' education and would provide significant data for municipalities: the key to handling air pollution with scientific rigor and deep knowledge. The air pollution standards could be ensured and respected thanks to the availability of information to the public, the development of local strategic plans and the assessment of the pollution sources.

Research and experimentations in the field of product design, capable of positively influence the living standards for many, are undoubtedly of particular relevance today. The multidisciplinary contribution of the designers, engineers, economists and programmers who participated in this project was certainly its main element of strength. The collaboration worked well because the group was able to place fundamental supporting thinking above the specialized single knowledge, in a perspective of essential contamination and joint action. A clear level of communication and, in some situations a healthy degree of disagreement, have contributed to the mutual recognition of specific professional and personal skills. These open methods of design and research, which integrate different topics, are «preconditions for the continuous, collaborative, social mode of enquiry and action that are needed» (Thackara, 2011, p. 42), and should be adopted more frequently both in research and in practice.

The working group is currently studying an updated version of the device in order to start a new test phase. At the same time, the team is working on the creation of documentation (a manual for

self-production, and programming code that can be optimized by third parties) available to download for free on a dedicated website, which will also allow the consultation of the improved map. Furthermore, brief interviews are being conducted with the people who participated in the test, to understand how to improve the overall user experience and the factors on which to insist to ensure a broader involvement in the network. Despite the work-in-progress experimentation and its technical-economic limits, this product represents a remarkable academic and practical contribution, which aims to be a reference for later research and that has already attracted the interest of the Municipality of Turin. The goal in the near future is to achieve greater public participation. The willingness to act and a high level of public awareness are imperative and should pave the way for any other kinds of technical solution (Fig. 16).

ACKNOWLEDGEMENTS

Thanks to all those who collaborated. The contribution is the result of a common reflection of the Authors. However, the paragraphs 'Introduction', 'Project context and phases of the experimentation', 'The self-produced monitoring device', 'Limits and socio-economic implications', 'Considerations, current status and future developments' and the figures (unless otherwise specified) are to be attributed to M. Vrenna, the paragraphs 'The map' and 'Participatory monitoring and data analysis' to M. Crétier, and the paragraph 'Open source programming' to S. Nelson Landén.

NOTES

- 1) Cfr.: Wijkman, A. and Rockström, J. (2014), *Natura in bancarotta. Perché rispettare i confini del pianeta*, Edizioni Ambiente, Milan; Raworth, K. (2017), *L'economia della ciambella. Sette mosse per pensare come un economista del XXI secolo*, Edizioni Ambiente, Milan.
- 2) A vast literature on these topics is available. It is suggested to consult: Bistagnino, L. (2011), *Design sistemico. Progettare la sostenibilità produttiva e ambientale*, Slow Food, Bra; Boehnert, J. (2018), *Design, ecology, politics: Towards the Ecocene*, Bloomsbury Academic, New York; Celaschi, F. (2016), *Non industrial design. Contributi al discorso progettuale*, Luca Sossella Edizioni, Bologna; Fry, T. (2009), *Design futuring: Sustainability, ethics, and new practice*, Bloomsbury Academic, London; Vezzoli, C., Kohtala, C. and Srinivasan, A. (eds) (2014), *Product-service system design for sustainability*, Greenleaf, Sheffield.
- 3) Similar experimentations already exist. The Senseable City Lab of the Massachusetts Institute of Technology, for example, works on projects aimed at using technology in cities to collect data (sensing) and respond to citizens' needs (acting). The Lab has conducted research about the air quality in New York, Nairobi and China. More information at the website: <http://senseable.mit.edu> [Accessed 29 March 2019].
- 4) The program Innovation for Change (I4C) aims to promote the creation of startups able to identify innovative solutions to the problems of contemporary society. In the 2018 edition, 51 students competed by presenting eight ideas. More information at the website: http://dot-torato.polito.it/innovation_for_change [Accessed 6 March 2019].
- 5) The project 'ARIA | Knowing is the first step for acting' was initially led by M. Crétier, F. Fontana, R. Pietrobon, J. Shan, A. Siciliani and M. Vrenna. Later, S. N. Landén provided programming support. The working group periodically met with P. Pisano, D. Malerba and T. Cocco, from the Department of Innovation of the City of Turin, as well as with the tutors of the I4C program.

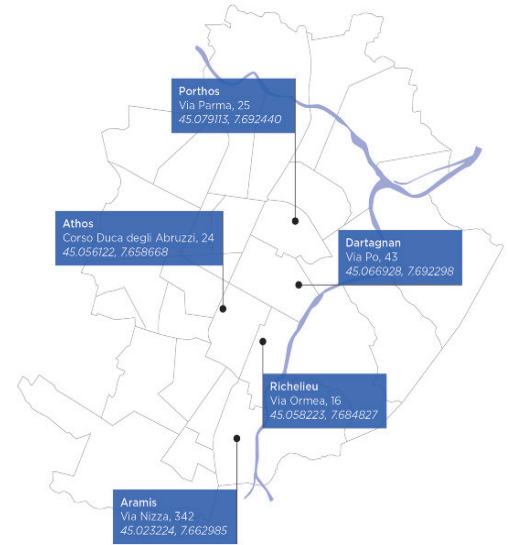
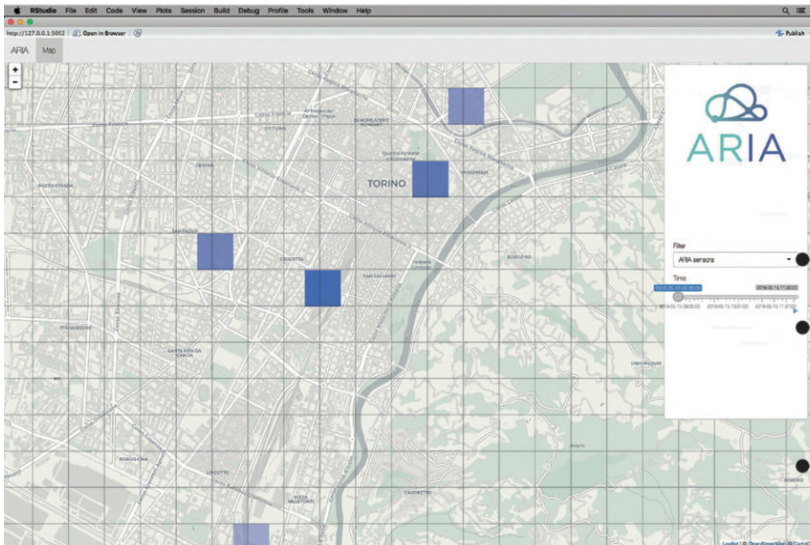


Fig. 11, 12 - The map allows the spatial-temporal consultation of the data collected by the participants, through a simple and intuitive interface; The sites in Turin where the devices were positioned during the test and data collection phase.

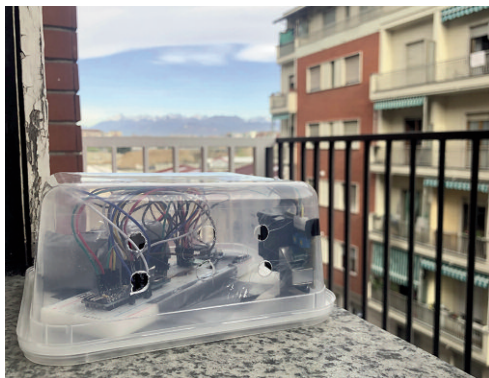


Fig. 13 - The Athos sensor on a balcony in Via Nizza.

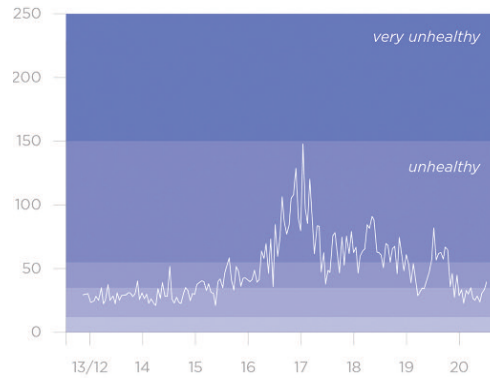


Fig. 14 - Graph of the variations of the average PM2.5 values monitored by the three sensors from 13 to 20 December. The horizontal bands highlight the different levels of health concern (good, moderate, unhealthy for sensitive groups, unhealthy and very unhealthy).

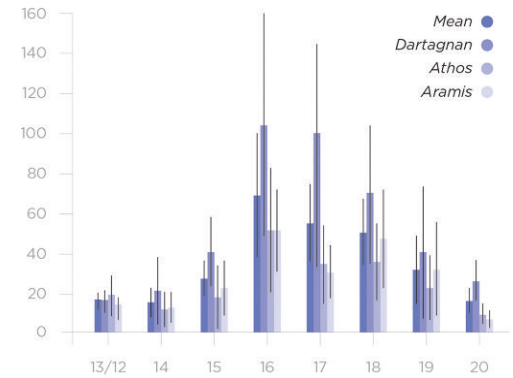


Fig. 15 - Average values and daily variance detected by each device (PM2.5).

6) Jury composed by: G. Saracco, Rector of Politecnico di Torino; C. Warakaulle, head of international relations at CERN; G. Crespi, Senior Partner & Managing Director of BCG Italy and N. Redi, Managing Partner of Venture Factory.
 7) Cfr.: Callegaro, F. (2018), "I giovani ingegneri si sfidano con progetti che migliorano la vita", in *La Stampa*, 26 June, p. 54; *Corriere della Sera* (2018), "Innovation for Change 2018, vincono i sensori che mappano l'inquinamento dell'aria", in *Corriere della Sera*, 26 June, [Online] available at: https://torino.corriere.it/cronaca/18_giugno_25/innovation-for-change-2018-vincono-sensori-che-mappano-inquinamento-aria-70cf5208-789e-11e8-a34f-88cbebf7b4e2.shtml [Accessed 3 March 2019].
 8) Torino Mini Maker Faire, June 2-3, 2018. [Online] Available at: <https://torino.makerfaire.com> [Accessed 13 March 2019].
 9) Shinyei model PPD42, PM2.5 detector. Monitoring of other pollutants was excluded for this test.
 10) The sizes of the second prototype are cm 18x18x9.
 11) For more information on R, visit the website: <https://www.r-project.org> [Accessed 2nd March 2019].
 12) The local office of ARPA (Regional Agency for Environmental Protection) operates on the territory of the Municipality, that is 130.17 km². Measurements are published daily.
 13) Visit the websites: <https://git-scm.com> and <https://www.openhub.net/repositories/compare> [Accessed March 2019].

14) More information on the website: <https://bitbucket.org/product> [Accessed 18 March 2019].
 15) Arduino open source programming software is available for download at <https://www.arduino.cc/en/Main/Software> [Accessed 6 March 2019].
 16) Visit the websites: <https://www.arduinolibraries.info/libraries/low-power> and <https://www.arduinolibraries.info/libraries/rt-club> [Accessed 8 March 2019].
 17) Alessandro Mecconi, data scientist.
 18) Cfr.: ANSA (2018), *Peggiora aria Torino, smog supera limiti*. [Online] Available at: http://www.ansa.it/pie/monte/notizie/2018/12/17/peggiore-aria-torino-smog-supera-limiti_fc5555e2-b35a-450e-883e-d306cf99123d.html [Accessed 28 January 2019].

REFERENCES

Boisseau, É., Omhover, J. and Bouchard, C. (2018), "Open-design: A state of the art review", in *Design Science*, vol. 4, pp. 1-44.
 Bonvoisin, J. and Boujut, J. (2015), "Open design platforms for open source product development: current state and requirements", in Weber, C., Husung, S., Cascini, G., Cantamessa, M., Marjanovic, D. and Montegna, F. (eds), *DS 80-8 Proceedings of International Conference on Engineering Design (ICED)*, vol. 8, Innovation and Creativity, Milano, pp. 1-10.
 Carullo, A., Corbellini, S. and Grassini, S. (2007), "A remotely controlled calibrator for chemical pollutant meas-

uring-units", in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 56, issue 4, pp. 1212-1218.
 EEA – European Environment Agency (2018), *Air quality in Europe. 2018 Report*, Publications Office of the European Union, Luxembourg.
 Franceschini, F., Galetto, M. and Maisano, D. (2005), "A short survey on air quality indicators: properties, use, and (mis)use", in *Management of Environmental Quality: An International Journal*, vol. 16, pp. 490-504.
 Hasenfratz, D., Saukh, O., Sturzenegger, S. and Thiele, L. (2012), "Participatory air pollution monitoring using smartphones", in *Mobile Sensing*, vol. 1, pp. 1-5.
 Howard, T. J., Achiche, S., Özkil, A. and McAlone, T. C. (2012), "Open design and crowdsourcing: maturity, methodology and business models", in Marjanovic, D., Storga, M., Pavkovic, N. and Bojetic, N. (eds), *Proceedings of DESIGN 2012, the 12th International Design Conference*, vol. 1, Dubrovnik, pp. 181-190.
 Humby, C. (2016), "Data is the new oil", in Wandisco (ed.), *Think big: Britain's data opportunity*, Wandisco, Sheffield.
 Keivani, R. (2010), "A review of the main challenges to urban sustainability", in *International Journal of Urban Sustainable Development*, vol. 1, issue 1-2, pp. 5-16.
 Levine, S. S. and Prietula, M. J. (2014), "Open collaboration for innovation: Principles and performance", in *Organization Science*, vol. 25, issue 5, pp. 1414-1433.
 Lewis, A. and Edwards, P. (2016), "Validate personal air-pollution sensors", in *Nature*, vol. 535, pp. 29-31.



Fig. 16 - Clear sky during the sunset in Stockholm (Sweden), one of the cities with the cleanest air in the world. The Municipality is promoting cycling and other sustainable practices and is offering incentives for cleaner vehicles. These are virtuous examples that do not involve technical solutions and should be of reference for other cities (credit: R. Balasko, 2017).

Raasch, C., Herstatt, C. and Balka, K. (2009), "On the open design of tangible goods", in *R&D Management*, vol. 39, issue 4, pp. 382-393.

Snyder, E. G., Watkins, T. H., Solomon, P. A., Thoma, E. D., Williams, R. W., Hagler, G. S. W., Shelow, D., Hindin, D. A., Kilaru, V. J. and Preuss, P. W. (2013), "The changing paradigm of air pollution monitoring", in *Environmental Science and Technology*, vol. 47, pp. 11369-11377.

Thackara, J. (2011), "Into the open", in van Abel, B., Evers, L., Troxler, P. and Klaassen, R. (eds), *Open design now: Why design cannot remain exclusive*, BIS Publishers, Amsterdam, pp. 42-45.

Tufte, E. R. (2001), *The visual display of quantitative information*, Graphic Press, Cheshire.

United Nations – Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2018), *World urbanization*

prospects. The 2018 revision. [Online] Available at: <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-KeyFacts.pdf> [Accessed 7 February 2019].

World Health Organization (2016), *Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease*, World Health Organization, Geneva.

^a MAURIZIO VRENNA is a PhD student in Management, Production, and Design at the Department of Architecture and Design of Politecnico di Torino (Italy). He has been involved in the development of sustainable products and services; his current research revolves on the topics of air pollution and microalgae production in urban areas. Mob. +39 346/05.67.133. E-mail: maurizio.vrenna@polito.it

^b MATTHIEU CRÉTIER is an MBA graduate and MSc in Vehicle Engineering. While in Sweden for almost 4 years he has developed electronics for sustainable and autonomous transportation. Currently based in Munich, he is responsible for digitalizing the conception and production of prosthetics and orthotics in a MedTech startup. Mob. +39 339/44.92.757. E-mail: matthieu.cretier@it.cdi.eu

^c SIMON NELSON LANDÉN, MSc in Mechatronics from KTH Royal Institute of Technology, Stockholm (Sweden). He has several years of experience as a software developer within embedded systems. He is currently working in the field of electrification. Mob. +46 (0)76/866.97.34. E-mail: simonnl@kth.se