

SENSORI A BASSO COSTO PER IL CONTROLLO DIFFUSO DELLA QUALITÀ DELL'ARIA URBANA

Grazia Ghermandi

Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari", Modena.

L'inquinamento atmosferico colpisce tutti, ed è la seconda principale causa di morte per malattie non trasmissibili dopo il fumo di tabacco. Secondo l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS), si sono verificati oltre 550.000 decessi in Europa nel 2016 attribuibili agli effetti congiunti dell'inquinamento atmosferico indoor e outdoor e stime recenti (Lelieveld et al., 2019), ancora più allarmanti, rendono l'inquinamento atmosferico la prima causa ambientale di morte prematura in Europa.

Oltre l'80% delle persone che vivono in aree urbane ove sia monitorato l'inquinamento atmosferico sono esposte a livelli di contaminanti che superano i limiti delle linee guida dell'OMS per la qualità dell'aria, con esposizioni più alte nei paesi a basso e medio reddito. In Europa, tra le principali

fonti di inquinamento atmosferico si trovano il traffico stradale, il riscaldamento domestico e la combustione industriale. Gli impatti ambientali del traffico veicolare sono assai rilevanti in molte aree metropolitane europee.

Le direttive sulla qualità dell'aria ambiente (2004/107/CE; 2008/50/CE) stabiliscono l'obbligo di sviluppare e attuare piani di qualità dell'aria e conseguenti misure per zone e agglomerati ove le concentrazioni di inquinanti superino gli standard dell'Unione Europea (UE). Piani e misure sono stati quindi implementati dagli stati membri, e costituiscono l'elemento centrale della gestione della qualità dell'aria. Nel 2013 la Commissione Europea ha pubblicato il pacchetto "Aria pulita" (Clean Air Policy) che mira sostanzialmente a ridurre l'inquinamento atmosferico in tutta l'UE,





Figura 1: Esempi di sensori a basso costo

stabilisce obiettivi per diminuire gli impatti sulla salute e sull'ambiente entro il 2030 e contiene proposte legislative volte ad attuare norme più severe in materia di emissioni e di inquinamento atmosferico.

Nel febbraio 2017, la Commissione Europea ha allertato cinque paesi, tra cui Spagna e Italia, per i ripetuti superamenti dei limiti di inquinamento atmosferico da biossido di azoto (NO_2), ed ha esortato tali stati ad attivarsi per garantire una buona qualità dell'aria e salvaguardare la salute pubblica.

Il maggiore contributo alle emissioni totali di biossido di azoto nell'UE viene dal settore dei trasporti su strada, mentre la combustione di carburanti nell'ambito di attività commerciali, istituzionali e domestiche contribuisce principalmente alle emissioni di particolato primario, soprattutto in alcune nazioni dell'Est Europa.

La maggior parte delle misure attivate dagli Stati membri in ottemperanza alle direttive sulla qualità dell'aria ambiente negli ultimi 3 anni mira a ridurre concentrazioni e numero di superamenti dei valori limite di PM_{10} e NO_2 (EEA, 2018). Per diminuire l'impatto del traffico veicolare si adottano agevolazioni per passare ad altre modalità di trasporto, si interviene su pianificazione urbanistica ed infrastrutture per il trasporto sostenibile, su miglioramenti al trasporto pubblico, sugli appalti pubblici.

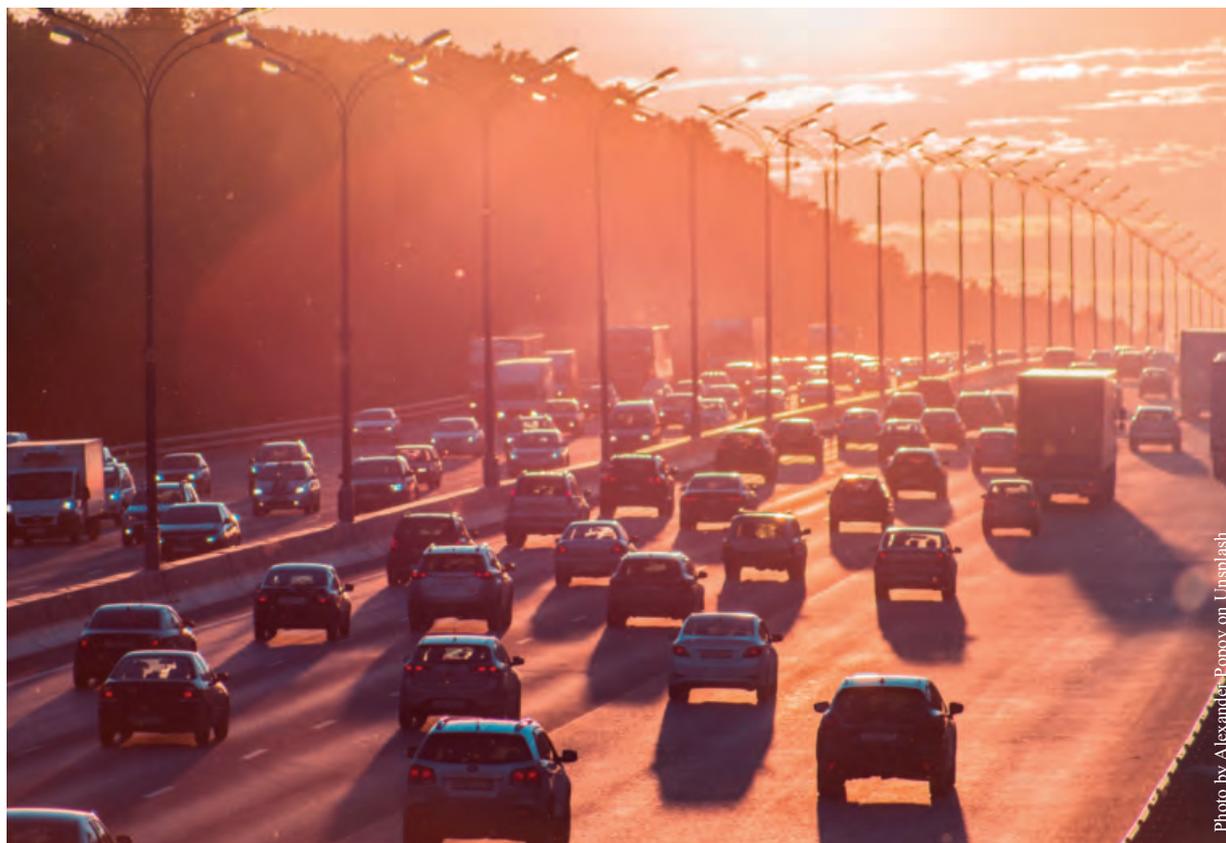
Seguono misure relative a combustione commerciale e residenziale, all'industria per il PM_{10} , e alla combustione industriale, commerciale e residenziale per NO_2 , prevedendo principalmente il passaggio a carburanti a basse emissioni, l'introduzione di apparecchiature per il controllo delle emissioni e l'aggiornamento delle tecnologie.

Sono infine importanti anche le modalità di comunicazione: l'amministrazione locale è il principale responsabile della pianificazione ed attuazione del-

le misure e della notificazione delle azioni che i singoli possono adottare per ridurre l'inquinamento atmosferico (EEA, 2018).

La valutazione della qualità dell'aria a termini di legge (D.Lgs 155 del 13/08/2010, attuazione 2008/50/CE) viene svolta dagli enti territoriali preposti (Agenzie ARPA) con reti di stazioni di misura in siti fissi, ove il monitoraggio segue un rigoroso protocollo Quality Assurance/Quality Control (QA/QC) per garantire incertezze di misura comprese in intervalli specifici ed appropriati allo scopo. I costi associati al mantenimento ed all'efficienza di tali siti di monitoraggio hanno però portato a una riconfigurazione delle reti di controllo normativo per la qualità dell'aria in Europa nell'ultimo decennio, con conseguente miglioramento delle reti, ma anche diradamento spaziale dei siti di misura fissi. Ciò risponde alle principali esigenze legislative, ma non alla crescente domanda di informazioni diffuse sulla qualità dell'aria nelle aree urbane, dove vive la maggior parte della popolazione mondiale (Nazioni Unite, 2015). Infatti, anche se la maggior parte delle misure attivate riguarda il settore trasporto su strada, si risente della mancanza di strumenti per stimare in modo efficiente e rapido il livello di inquinamento nelle diverse zone delle città, derivante principalmente dalle condizioni del flusso di traffico: tali strumenti potrebbero ottimizzare le strategie di controllo ed anche accrescere nella popolazione la consapevolezza delle condizioni di qualità dell'aria.

Sono stati quindi sviluppati ulteriori approcci per stimare lo stato di inquinamento in ambienti complessi come le aree urbane: fra i più promettenti fino ad ora adottati, si trovano la simulazione della dispersione atmosferica di inquinanti e l'utilizzo di piccoli sensori *a basso costo*. Il primo approccio prevede la modellizzazione della disper-



sione con software di diversa complessità ed adeguata scala spazio-temporale, ampiamente documentati in letteratura, mentre il secondo consiste nella dislocazione di sensori per mappare la qualità dell'aria con risoluzione temporale (Bigi et al., 2018), o altre applicazioni, migliorando la copertura dell'area urbana. L'utilizzo di sensori *a basso costo* per la misura di inquinanti atmosferici in fase gas o particolato, soluzione tra le più economiche e di facile installazione, è oggi oggetto di notevole attenzione: nel prossimo futuro nei paesi "sviluppati" essi saranno affiancati alle stazioni di monitoraggio normativo in aree urbane per aumentare la copertura spaziale, pur fornendo dati affetti da maggiore incertezza. Mentre nelle zone urbane di paesi in via di sviluppo essi potrebbero sostituirsi alle centraline di qualità dell'aria normative, per le quali manca l'infrastruttura necessaria.

I moderni sensori a basso costo per la misura di concentrazioni atmosferiche di inquinanti si basano su tecnologie consolidate: es. PID (ionizzazione tramite radiazione UV) per la stima di VOC, NDIR (assorbimento di radiazione infrarossa) per la stima di CO₂, ossidi metallici semiconduttori (MOX) o celle elettrochimiche per la stima di vari gas (es. CO, O₃, NO, NO₂, CH₄) e scattering per il conteggio del particolato aerodi-

sperso. Le elevate aspettative riposte in questi sensori si scontrano però con problemi di calibrazione, stabilità, sensibilità incrociata e basse ripetibilità e riproducibilità, che comportano ulteriori ricerche e test per consentirne un uso consapevole.

La calibrazione è uno dei principali problemi ancora non risolto appieno, che limita l'uso di questi dispositivi: infatti la calibrazione dovrebbe essere rappresentativa dei principi di funzionamento del sensore, della risposta di esso in tutte le possibili condizioni ambientali e dell'invecchiamento del sensore stesso. Le principali procedure di calibrazione prevedono test del funzionamento dei sensori in laboratorio in condizioni controllate, e/o collocazione di essi sul campo accanto a uno strumento di riferimento calibrato: non è però possibile generalizzare i risultati quando le misure vengano eseguite in un sito diverso da quello di calibrazione. L'effetto, non trascurabile, del trasferimento dei sensori ad un luogo diverso da quello in cui è avvenuta la calibrazione sul campo è poco descritto in letteratura, mentre numerosi studi mostrano risultati di calibrazione sul campo e di successiva distribuzione di sensori nello stesso sito. L'elaborazione dei dati di calibrazione, in particolare riguardo ai sensori per inquinanti gassosi, dà migliori risultati con l'uso

di complessi modelli non lineari, comprendenti diverse variabili di regressione (comunemente anche parametri meteorologici) oltre alla variabile associata all'inquinante target. È però possibile utilizzare algoritmi di machine learning per simulare set di equazioni non lineari: ad esempio Random Forest è un algoritmo di machine learning di uso relativamente semplice, che ha dato buoni risultati nella calibrazione di sensori a basso costo, anche se modelli più complessi su reti neurali hanno dato risultati altrettanto soddisfacenti. Questi algoritmi consentono di calibrare tali sensori dopo una breve collocazione, includendo adeguate variabili di input.

Alle esigenze di pubbliche amministrazioni e comunità risponde il progetto TRAFair (<http://trafair.eu/>), finanziato nell'ambito del programma CEF-TELECOM 2017, ed avviato a novembre 2018. Il progetto si concentra sulla valutazione della qualità dell'aria e sulle previsioni su scala 'micro' urbana, abbinando la modellizzazione lagrangiana della dispersione di inquinanti gassosi, il monitoraggio spazio-temporale dei gas (una rete di sensori a basso costo) e tassi realistici di flusso del traffico, tramite un modello dinamico basato su dati sul traffico in tempo reale. Le città test di TRAFair sono Modena, Firenze, Pisa, Livorno in Italia, Saragozza e Santiago de Compostela in Spagna: Modena è leader del consorzio.

A Modena, città di 180 mila abitanti della Pianura Padana, un hotspot di qualità dell'aria con due stazioni fisse di monitoraggio normativo di ARPAe, sono stati installati dodici unità di sensori portatili. Ogni unità monta 4 sensori per misurare serie temporali di NO, NO₂, CO e O₃, che trasmette a un database centrale tramite una infrastruttura LoRaWAN. Le unità sono calibrate su base periodica bimestrale: dopo 2 settimane di collocazione presso le stazioni fisse ARPAe vengono distribuite in tutta la città. La calibrazione con un algoritmo di machine learning rimane ragionevolmente costante dopo brevi periodi di collocazione e fornisce per i sensori utilizzati un'incertezza di ca. il 25% per NO e NO₂, anche dopo un trasferimento.

Questi sensori vengono utilizzati per la mappatura della qualità dell'aria urbana in tempo reale e per testare e validare due modelli lagrangiani di dispersione a microscala utilizzati per Modena: Parallel Micro Swift Spray (PMSS, Arianet srl, Italia e Aria Technologies, Francia) e GRAL (Graz Lagrangian Model), applicati per valutare l'im-

patto delle emissioni del traffico sulla qualità dell'aria locale. Il dominio di simulazione copre l'intera area urbana di Modena (6 km x 6 km) con risoluzione orizzontale di 4 m, e considera la topografia urbana e l'edificato. Durante la seconda metà del progetto, i modelli di dispersione dell'aria produrranno mappe previsionali di NO_x per le successive 48 ore, avvalendosi delle previsioni meteorologiche del modello COSMO (su griglia di 5 km x 5 km) fornite da ARPAe. Un obiettivo del progetto sarà quindi la preparazione di un protocollo QA/QC per unità di sensori di piccole dimensioni e l'implementazione di una catena modellistica di previsione dell'impatto del traffico sulla qualità dell'aria locale a microscala.

Obiettivo finale del progetto è lo sviluppo di uno strumento per supportare gli amministratori locali nel controllo dell'inquinamento ed informare la cittadinanza sulla qualità dell'aria e sull'impatto delle fonti di emissione urbane, in particolare del traffico. Questa misura di comunicazione pubblica di 'informazioni rilevanti', auspicata in ambito europeo, è essenziale per condividere con i cittadini le azioni degli amministratori locali e può rafforzare gli effetti, perché accresce nella comunità la consapevolezza di partecipare alla protezione di un bene comune.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/news/news/2019/6/beat-air-pollution-to-protect-health-world-environment-day-2019>.
- Lelieveld J. et al. (2019) Cardiovascular disease burden from ambient air pollution in Europe reassessed using novel hazard ratio functions *European Heart Journal*, 40, 1590–1596 <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehz135>
- EEA (2018) Air quality in Europe, European Environmental Agency, Report No 12/2018. ISSN 1977-8449
- UN (2015): World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, United Nations, Tech. Rep. ST/ESA/SER.A/366, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 27 pp.
- Bigi A., Mueller M., Grange S.K., Ghermandi G., and Hueglin C. (2018) Performance of NO, NO₂ low cost sensors and three calibration approaches within a real world application, *Atmos. Meas. Tech.*, 11, 3717-3735 <https://doi.org/10.5194/amt-11-3717-2018>