

Estación para monitoreo de la calidad del aire.

López Sardi M., Florio N.

RESUMEN

La alteración de la calidad del aire tiene fuerte repercusión en la salud humana, en las plantas y en los animales. La contaminación atmosférica también provoca cambios en el clima y afecta importantes actividades económicas. Fenómenos como la lluvia ácida provocan daños en cultivos, bosques y estructuras. Para poder desarrollar políticas destinadas a minimizar o remediar este tipo de impactos es imprescindible monitorear periódicamente el estado de la atmósfera. En el trabajo se describe un proyecto de investigación y desarrollo de carácter interdisciplinario, cuyo objetivo es desarrollar una estación de monitoreo de calidad del aire y, en forma conjunta, diseñar el sistema de almacenamiento y procesamiento de datos, el cálculo del índice de calidad del aire y la difusión de los resultados obtenidos.

ABSTRACT

The alteration of the air quality has a strong impact on human health, and also on plants and animals. Air pollution is responsible for climate changes and affects important economic activities. The acid rain causes damages to crops, forests, and structures. In order to develop policies to minimize this type of impact, it is essential to periodically measure the state of the atmosphere. The full paper describes an interdisciplinary research project whose aim is to develop an air quality monitoring station. Jointly, the research team is working to design the data storage and data processing system, the calculation of the air quality index and the dissemination of the obtained results.

PALABRAS CLAVE

Contaminación atmosférica, estación de monitoreo, índice de calidad del aire.

KEY WORDS

Atmospheric pollution, monitoring station, air quality index.

CONTEXTO

El proyecto de investigación y desarrollo “Prototipo de estación para monitoreo de la calidad del aire” (PMCA) se desarrolla en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Palermo, entidad que también se ocupa del financiamiento de la iniciativa. Se trata de un proyecto interdisciplinario, que implica la aplicación de conocimientos de las áreas Ingeniería Electrónica, Ingeniería Informática y Ciencias del Ambiente.

INTRODUCCIÓN

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la contaminación atmosférica es el principal riesgo ambiental para la salud en las Américas [1, 2] Se estima que una de cada nueve muertes en todo el mundo es el resultado de condiciones relacionadas con la contaminación atmosférica [3] Entre los contaminantes atmosféricos más relevantes para la salud se encuentra el material particulado (PM), que puede penetrar profundamente en los pulmones y provocar daños de variado orden. La mayoría de estos contaminantes son el producto de la quema de combustibles fósiles, pero su composición puede variar según sus fuentes. Las directrices de la OMS sobre la calidad del aire recomiendan una exposición máxima de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para las PM_{10} (partículas de diámetro aerodinámico de hasta $10 \mu\text{m}$) y una exposición máxima de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para las $\text{PM}_{2.5}$ (con diámetro aerodinámico de hasta $2,5 \mu\text{m}$). Mientras que PM_{10} provocan daños a nivel del sistema respiratorio, $\text{PM}_{2.5}$ pueden llegar a los alveolos e incluso pasar al torrente sanguíneo, lo que implica daño potencial para cualquier órgano o sistema.

En las Américas, se producen 93.000 defunciones anuales en países de ingresos bajos y medios (LMIC) y 44.000 en países de ingresos altos (HI) vinculadas a la contaminación atmosférica. Las muertes por habitante son 18 por 100.000 en los países LMIC y 7 por 100.000 en los países de HI [2] Los riesgos y efectos en la salud no están distribuidos equitativamente en la población. Las personas con enfermedades previas, los niños menores de cinco años y los adultos entre 50 y 75 años de edad son los más afectados. Las personas pobres y aquellas que viven en situación de vulnerabilidad, así como aquellos que utilizan estufas tradicionales de biomasa para cocinar y calentarse constituyen un grupo de alto riesgo. Se conocen efectos de la contaminación del aire sobre la salud a corto y largo plazo, siendo la exposición a largo plazo y de larga duración la más significativa para la salud pública. La mayoría de las muertes atribuibles a la contaminación atmosférica en la población general están relacionadas con las enfermedades no transmisibles. En efecto, el 36% de las muertes por cáncer de pulmón, el 35% de la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (COPD), el 34% de los accidentes cerebrovasculares y el 27% de las cardiopatías isquémicas tienen relación con exposición a la contaminación atmosférica. Sin embargo, el mayor impacto es sobre la mortalidad infantil, ya que más de la mitad de las muertes de niños menores de 5 años causadas por infecciones agudas de las vías respiratorias inferiores (ALRI) están vinculadas a partículas inhaladas por la contaminación del aire interior producto del uso de combustibles sólidos [4] La contaminación del aire en los hogares, que proviene

principalmente de cocinar en estufas tradicionales a fuego abierto, es responsable del 12% de la contaminación global por partículas finas ambientales ($PM_{2.5}$) [5] El 79% de la población de América Latina y el Caribe vive en pueblos y ciudades con más de 20.000 habitantes [6] Esto representa una importante demanda de energía, incluyendo la provisión de servicios, la producción y consumo de materiales y bienes, el transporte y la movilidad. Todas estas actividades se vinculan con la contaminación del aire. El transporte de mercancías y la movilidad humana se basan principalmente en soluciones individuales, que exigen un alto consumo de energía con baja eficiencia. Además, los vertederos de residuos urbanos, en muchos casos a cielo abierto, representan una fuente de emisiones de metano y de grandes cantidades de partículas finas por incendios accidentales y no accidentales, con grandes aportaciones potenciales a la contaminación atmosférica en entornos urbanos. La quema de cultivos sigue siendo legal y se practica ampliamente en muchos países, lo que también contribuye a la mala calidad del aire. Entre las partes interesadas en el control de la contaminación del aire se incluyen organizaciones estatales y gubernamentales, ONGs, empresas e industrias y grupos de trabajo en áreas de salud pública y ambiental.

La naturaleza física y composición de los contaminantes químicos atmosféricos es muy variada. Además de por su origen natural o antropogénico, los contaminantes se clasifican en primarios y secundarios. Los primarios son sustancias vertidas directamente a la atmósfera, entre los que se encuentran los aerosoles o partículas, los óxidos de azufre, los óxidos de nitrógeno, el monóxido de carbono y los hidrocarburos. Los contaminantes secundarios son sustancias que se producen como consecuencia de las transformaciones, reacciones químicas y fotoquímicas que sufren los contaminantes primarios en el seno de la atmósfera [7]

Algunos de los principales contaminantes atmosféricos son:

Óxidos de azufre (SOx): Se forman por la combustión de cualquier sustancia que contenga azufre, como el carbón o el petróleo, generando dióxido de azufre (SO_2) como contaminante primario. El trióxido de azufre (SO_3) se forma en la atmósfera, como contaminante secundario, por la acción fotoquímica sobre el dióxido de azufre, así como el ácido sulfúrico (H_2SO_4) que se produce por la oxidación catalítica de los óxidos de azufre en las gotas de agua de lluvia. Se estima que en el hemisferio norte más del 90% de la producción de óxidos de azufre es de origen antropogénico.

Óxidos de nitrógeno (NOx): La mayor parte de las emisiones antrópicas de óxidos de nitrógeno se producen en forma de óxido nítrico (NO), como contaminante primario en los procesos de combustión de combustibles fósiles como petróleo, carbón o gas natural. La oxidación posterior del NO da lugar al dióxido de nitrógeno (NO_2) y posteriormente al ácido nítrico (HNO_3), como contaminantes secundarios.

Monóxido de carbono (CO): El monóxido de carbono (CO) es el contaminante más abundante en la capa inferior de la atmósfera, y su origen antropogénico es debido a la combustión incompleta de materia orgánica (gas, carbón, madera, etc.), en especial los

carburantes de los automóviles. Al oxidarse en la atmósfera genera dióxido de carbono (CO_2).

Partículas o aerosoles: Como partículas se engloban tanto diminutos fragmentos sólidos como gotas de líquido de pequeño tamaño, que pueden tener composición química diversa. Este grupo incluye las partículas sedimentables y en suspensión, y los humos. Alrededor de un 80% de las partículas presentes en la atmósfera tienen origen natural (aerosoles marinos, arrastre de polvo por el viento, erupciones, incendios, polen, etc.). Las fuentes antropogénicas más importantes son los procesos de combustión y las pérdidas en procesos extractivos e industriales (minería, canteras, fábricas de cemento, tratamientos de residuos, etc.). También es importante cuantitativamente la formación de aerosoles secundarios a partir de contaminantes gaseosos primarios.

Compuestos orgánicos volátiles (COV): Forman parte de este grupo todos aquellos hidrocarburos que se presentan en estado gaseoso a temperatura ambiente normal o que son muy volátiles a dicha temperatura. Tienen un origen tanto natural como antropogénico (debido a la evaporación de disolventes orgánicos, a la quema de combustibles, al transporte, etc.). Se caracterizan por participar en reacciones químicas en la atmósfera generando otros contaminantes, como el ozono.

Ozono (O_3): El ozono es un contaminante secundario. Se denominan “precursores del ozono troposférico” a las sustancias que intervienen en la formación de ozono en la parte más baja de la atmósfera, siendo las principales los óxidos de nitrógeno (NO_x), los compuestos orgánicos volátiles (COV) y el monóxido de carbono (CO).

Compuestos halogenados: Entre los de mayor incidencia sobre la calidad del aire se encuentran los compuestos de flúor, los de cloro y los freones. Los compuestos de flúor son emitidos principalmente por las industrias de la cerámica, de aluminio y de vidrio. Los compuestos de cloro son emitidos principalmente por la industria petroquímica. Destacan en este grupo los clorofluorocarbonos (CFC), gases de los que no existen fuentes naturales, hasta hace poco muy utilizados en la industria de fabricación de espumas y aislantes, como fluidos refrigerantes y como propelentes en aerosoles.

Metales pesados: Los metales pesados son elementos químicos que generalmente se hallan presentes en la atmósfera en muy bajas concentraciones, por lo que su origen procede en su gran mayoría de fuentes antrópicas. Las emisiones de metales pesados se originan fundamentalmente en grandes instalaciones de combustión, industria de calcinación y síntesis de minerales metálicos, fundiciones, acerías y otras instalaciones metalúrgicas, industria de producción de cemento y vidrio e instalaciones de incineración de residuos urbanos y sanitarios. Una de las características más peligrosas de los metales tóxicos en el ambiente es que no son degradados, ni química ni biológicamente, por la naturaleza. Entre los metales tóxicos más importantes por sus efectos sobre la salud del ser humano están el mercurio (Hg) y el plomo (Pb), aunque también se encuentran en la atmósfera otros metales como cadmio, níquel, cobre, cromo o arsénico.

Dioxinas: Se trata de compuestos químicos generados a partir de procesos de combustión de productos en cuya composición participa el cloro, especialmente en procesos en que tiene lugar una combustión incompleta. En los países industrializados, los principales emisores son actualmente los incineradores de residuos sólidos urbanos y patológicos, pero también se utilizan en el blanqueado de papel con cloro, o en diferentes biocidas. El término se aplica indistintamente a los policlorodibenzofuranos (PCDF) y las policlorodibenzodioxinas (PCDD).

Para apoyar las mediciones de calidad del aire es importante realizar simultáneamente la medición de variables meteorológicas como temperatura, velocidad y dirección del viento, presión y humedad ambiente. Otras variables que pueden ser útiles a la hora de evaluar los datos recogidos son la radiación solar y la radiación UV.

Se pueden diferenciar tres tipos de muestreo [8]:

Muestreo continuo

Consiste en tomar muestras de forma continua a lo largo del año. Este muestreo continuo puede ser en tiempo real (en el caso de los analizadores automáticos) o en períodos de 24 horas o tiempos inferiores o superiores predefinidos.

Muestreo periódico

Basado en un plan predefinido y consistente básicamente en:

- Muestreo por estaciones. Por ejemplo, un mes o dos semanas cada período estacional.
- Un día de cada ocho. Muy útil cuando hay limitaciones económicas o de recursos humanos. De esta manera, se tienen muestras representativas de todos los días del año.

Muestreo puntual

- Determinados días y horas, en función de los objetivos y alcance del proyecto.
- La ubicación de las estaciones de monitoreo debe ser de fácil accesibilidad para el personal a cargo y de mantenimiento.
- Deben encontrarse a resguardo del vandalismo.
- Los equipos deben estar protegidos contra la caída de rayos (pararrayos y toma a tierra).
- Los contenedores de los equipos se recomienda que sean de PVC.

- El suministro eléctrico durante el monitoreo debe estar garantizado.

OBJETIVOS

El objetivo general es desarrollar una estación de monitoreo de la calidad del aire de costo accesible, construida con materiales disponibles en el mercado, que permita realizar evaluaciones de la contaminación atmosférica en situaciones puntuales o en proyectos a largo plazo. El equipo de monitoreo, debe presentar diferentes capacidades

- Detección de pérdidas de gases.
- Prevención de fallas y accidentes.
- Emisión de alertas.
- Evaluaciones de impacto ambiental.
- Prevención en salud pública.

METODOLOGÍA

Para la construcción del primer prototipo se utilizaron los siguientes sensores:

- Monóxido de carbono (MQ7) 50-4000 ppm
- Metano (MQ8) 200-1000 ppm
- Dióxido de azufre (ULPSM-SO₂) 0-20 ppm
- Dióxido de nitrógeno (ULPSM-NO₂) 0-20 ppm
- Dióxido de carbono (T6713-5K) 0-5000 ppm
- Humedad (AM2302) 0-99.9%
- Sensor de polvo (material particulado) (SM-PWM-01C) 7-2400 ug/m³
- Presión atmosférica y temperatura (BMP280) 300-1100 hPa
- Compuestos volátiles (VZ-89TE) 0-1000 ppb (CO₂ eq VZ-89TE 400-2000 ppm)

Para implementar el sistema, se decidió utilizar una computadora de placa única llamada Raspberry Pi modelo 3. Esta computadora es capaz de correr un servidor web y una base de datos. La comunicación entre los sensores se realiza mediante el protocolo I2C y con puertos denominados GPIO (General Purpose Input-Output), siendo éstos digitales. Raspberry posee ciertas limitaciones para funcionar algunos de los sensores: diferencia de niveles de tensión entre sensores y la Raspberry; falta de conversión analógica a digital; imposibilidad de manejar salidas de potencia para variar tensión de alimentación del calefactor del sensor que mide monóxido de carbono; falta de captura de tiempo para el sensor que mide polvo. Con el fin de solucionar estas limitaciones se implementó un circuito interfaz entre los sensores y la computadora Raspberry. La interfaz implementa las siguientes funciones mediante el uso de un microcontrolador PIC18F4620:

- Comunicación por protocolo I2C.
- Conversión ADC.
- Cambio de tensión de alimentación del calefactor del sensor que mide monóxido de carbono.
- Captura de tiempo para el sensor de medición de partículas de polvo.
- Conversión de tensión bidireccional de 3.3V a 5V.

Finalmente, se diseñó un circuito capaz de interconectar a los sensores con el circuito interfaz. Esta plaqueta contiene a todos los sensores con excepción de aquellos que miden material particulado y el sensor de humedad, los cuales deben ser colocados en forma más expuesta al aire exterior y en posición vertical. El software para el microcontrolador PIC18F4620 se desarrolló en lenguaje C. Este software implementa el protocolo I2C mediante la interrupción de alta prioridad. También utiliza conversión ADC mediante interrupción. La captura de tiempo se realiza usando el módulo CCP (Capture/Compare/PWM).

Una de las condiciones que se tomaron en cuenta para el diseño de hardware y software de la estación de monitoreo es que sea versátil. Esto significa que el diseño se pueda adaptar fácilmente a las necesidades de futuros interesados: uso de sensores diferentes o en distinta cantidad respecto a los propuestos en este prototipo. Esta versatilidad, permitirá generar en el futuro una variedad de productos adaptables a las necesidades particulares de potenciales clientes y a las diversas circunstancias de distintos entornos interiores o exteriores.

Para la evaluación ambiental de los datos recogidos por la estación de monitoreo y su posterior comunicación a la comunidad, se calculará el índice de calidad del aire (ICA). El

modelo de cálculo que se implementará en la determinación del ICA será el que la Agencia Europea de Medio Ambiente puso en marcha en noviembre de 2017 [9] Este índice permite evaluar la calidad en forma horaria, diaria y anual. Los valores límites empleados para cada contaminante se basan en los resultados de estudios avalados por la OMS. La selección recayó en este índice debido a que la legislación de la Unión Europea es una de las más avanzadas y mejor actualizadas del mundo en el área ambiental.

El ICA se basa en la determinación de cinco contaminantes: NO₂, SO₂, CO, O₃ y PM₁₀. Para cada uno de ellos se evalúa la calidad del aire en forma individual, estableciéndose un índice parcial. El valor de ICA global para un lapso de tiempo determinado será igual al peor índice parcial calculado en ese intervalo [10] Los resultados se comunican a la opinión pública mediante una escala de colores, como se puede ver en la imagen 1:

Imagen 1: Rangos de concentración utilizados para el ICA horario.

Estado calidad del aire	SO ₂	NO ₂	CO	O ₃	PM ₁₀	PM _{2,5}
Muy buena	0-140	0-100	0-5	0-60	0-40	0-25
Buena	140-210	100-140	5-7	60-120	40-60	25-40
Mejorable	210-350	140-200	7-10	120-180	60-120	40-60
Mala	350-500	200-400	10-15	180-240	120-180	60-90
Muy mala	500-10000	400-10000	>15	240-10000	180-10000	90-10000

Fuente: Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial y Vivienda. Euskadi. *Medio Ambiente. Aire.*

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se ha finalizado la construcción del primer prototipo, el cual se encuentra en la etapa de calibrado y prueba piloto. En la imagen 2 se pueden observar distintos aspectos interiores y exteriores del mismo.

Imagen 2: Prototipo de estación de monitoreo construida en la UP.



Fuente: Elaboración propia.

Simultáneamente se está trabajando en una segunda generación del prototipo en la que se utilizan sensores con mayor rango de detección para los cinco contaminantes principales, lo que permitirá optimizar el cálculo del ICA. Actualmente, un grupo de investigadores del área informática de la facultad se encuentra trabajando en el desarrollo del software que permita el almacenado y procesamiento de los datos, el cálculo del ICA y la publicación mediante una interfaz gráfica de usuario que simplifique el acceso e interpretación de la información. De este modo se facilitará el acceso a los datos obtenidos en tiempo real así como a los registros históricos. La complementación entre el prototipo desarrollado (hardware) y el sistema de almacenamiento y procesamiento de datos (software), así como la posibilidad de seleccionar el conjunto de sensores a utilizar en la construcción de versiones futuras, conducirá al desarrollo de productos adaptables a cada necesidad específica en materia de monitoreo de calidad del aire exterior o interior.

CONCLUSIONES

Con la implementación de este proyecto, los investigadores de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Palermo esperamos estimular el desarrollo de otros proyectos similares en distintos puntos del país con el fin de crear una red que permita monitorear la calidad del aire y difundir los resultados, creando conciencia de la importancia que un aire limpio tiene en materia de salud pública y en la seguridad e higiene industrial.

BILBIOGRAFIA

- [1] Organización Panamericana de la Salud. (2017). *Contaminación del aire ambiental*. Disponible en: http://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=12918%3A2017-ambient-air-pollution&catid=2619%3Aenvironmental-health&Itemid=42246&lang=es
- [2] World Health Organization. (2018). *Preventing disease through healthy environments: a global assessment of the burden of disease from environmental risks*. Disponible en: http://www.who.int/quantifying_ehimpacts/publications/preventing-disease/en/
- [3] WHO. (2016). *Ambient air pollution: a global assessment of exposure and burden disease*. Disponible en: <http://www.who.int/phe/publications/air-pollution-global-assessment/en/>
- [4] Balakrishnan et al (2014). *Burden of disease from Ambient Air Pollution for 2012*. Disponible en: http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/AAP_BoD_methods_March2014.pdf?ua=1&ua=1
- [5] United Nations. (2014). *Statistical Yearbook for Latin America and the Caribbean*.

Disponible en: <https://www.cepal.org/en/comunicados/ya-esta-disponible-el-anuario-estadistico-de-la-cepal-de-2014>

- [6] WHO. (2016). *Burning opportunity: clean household energy for health, sustainable development, and wellbeing of women and children*, 2016. Disponible en: http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/204717/1/9789241565233_eng.pdf?ua=1&ua=1
- [7] Red Ambiental de Asturias. (2018). *Conceptos generales de contaminación atmosférica*. Disponible en: <http://movil.asturias.es/portal/site/medioambiente/menuitem.1340904a2df84e62fe47421ca6108a0c/?vgnnextoid=daca2ae109539210VgnVCM10000097030a0aRCRD&vgnnextchannel=761ab1cc11b6a110VgnVCM1000006a01a8c0RCRD&i18n.http.lang=es>
- [8] DIGESA. (2005). *Protocolo de Monitoreo de la Calidad del Aire y Gestión de los Datos*. Disponible en: http://www.digesa.minsa.gob.pe/norma_consulta/Protocolo-de-Calidad-del-Aire.pdf
- [9] Agencia Europea de medio Ambiente. (2017). *Índice europeo de calidad del aire: información actualizada a su alcance sobre la calidad del aire*. Obtenido en septiembre de 2018 en: <https://www.eea.europa.eu/es/highlights/indice-europeo-de-calidad-del>
- [10] Gobierno de Aragón. (2018). *Índice diario de calidad del aire*. Obtenido en junio de 2018 en: http://www.aragonaire.es/assets/documents/IDCA_GobAragon.pdf
- [11] Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial y Vivienda. Euskadi. (2018). *Medio Ambiente. Aire*. Obtenido en septiembre de 2018 en: <http://www.euskadi.eus/informacion/evaluacion-de-la-calidad-del-aire-en-euskadi/web01-a2ingair/es/#4358>