

OLORES-19
26-27 NOVIEMBRE 2019, SANTIAGO, CHILE

**ESTUDIO DE COMBINACIÓN DE DIFERENTES TÉCNICAS DE
TRATAMIENTO DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE INTERIOR PARA LA
ELIMINACIÓN DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO, COVS Y MATERIAL
PARTICULADO**

**STUDY OF THE COUPLING OF DIFFERENT INDOOR AIR POLLUTION
TREATMENT TECHNIQUES FOR THE REMOVAL OF NITROGEN OXIDES,
COVS AND PARTICULATE MATTER.**

Autores

C. Hort^{1*}, E. Hallemans², G. Coulbaux², M. Binet³, V. Platel¹, L. Moynault¹, V. Héquet⁴, Y. Andres⁴, A. T. Luengas¹, S. Leroy², C. Neaud²

¹ Univ Pau & Pays Adour / E2S UPPA, Laboratoire de Thermique, Énergétique et Procédés (LaTEP), IPRA, EA1932, 64000 Pau, France.

² Cerema Ile-de-France – 12 rue Teisserenc de Bort, 78190 Trappes-en-Yvelines, France

³ Société Air Sûr Paris Région Innovation Nord Express – 46 rue René Clair, 75018 Paris, France.

⁴ IMT Atlantique, DSEE, GEPEA UMR CNRS 6144 – 4 Rue Alfred Kastler, 44300 Nantes, France.

Palabras clave: Calidad del aire interior, Adsorción, Filtración, Fotocatálisis, Eficiencia de Remoción.

Keywords: Indoor air quality, Adsorption, Filtration, Photocatalysis, Removal efficiency.

Resumen

La contaminación del aire interior es una de las mayores preocupaciones en cuanto a la salud pública se refiere. Según un reciente estudio de la agencia francesa Anses¹, este tipo de contaminación acarrearía un costo socioeconómico de alrededor de 20 billones de euros por año en Francia, por lo que el tratamiento del aire interior se ha convertido en un desafío importante.

El proyecto CUBAIR² presentado en este artículo tenía como objetivo desarrollar y evaluar un prototipo original, acoplando la adsorción, la filtración y la fotocatálisis como técnicas de depuración del aire. La evaluación del rendimiento de este prototipo se realizó *in situ* durante cerca de 10 meses y realizando medidas de diferentes parámetros y contaminantes como los óxidos de nitrógeno y los COVs haciendo hincapié en los BTEX y algunos aldehídos. Otras campañas de medición se llevaron a cabo para determinar las concentraciones de material particulado (PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀), algunos parámetros microbiológicos, parámetros de confort o bienestar (temperatura,

¹ Anses: Agencia francesa de la seguridad sanitaria de la alimentación, el ambiente y el trabajo.

² CUBAIR: Confort des Usagers des Bâtiments tertiaires par l'usage de techniques de traitement de l'AIR

humedad relativa), así como también el caudal de aire a la salida del prototipo. Los resultados obtenidos en condiciones reales de funcionamiento muestran una buena eficiencia en la remoción de los óxidos de nitrógeno y más concretamente para el NO₂ con una reducción del 86%. Igualmente, el material particulado PM₁ se redujo en más del 75%.

Abstract

Indoor air pollution is one of the biggest concerns in terms of public health. In France, it was estimated that indoor air pollution would bring about a socio-economic cost of around 20 billion euros per year. In this context, the treatment of this kind of pollution has become an important challenge.

The CUBAIR project aimed to develop and evaluate an original prototype, combining air purification techniques such as adsorption, filtration and photocatalysis. The evaluation of the performance of this prototype was carried out *in situ* during 10 months and different measurements were taken for parameters and pollutants such as nitrogen oxides and VOCs with emphasis on BTEX and some aldehydes. Other measurement campaigns were carried out to determine particle concentrations (PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀), microbiological parameters, comfort parameters (temperature, relative humidity), as well as the air flow of the prototype. The results show a good removal efficiency (RE) of nitrogen oxides with a RE of 86% for the NO₂. Likewise, PM₁ was reduced by more than 75%.

1. Introducción

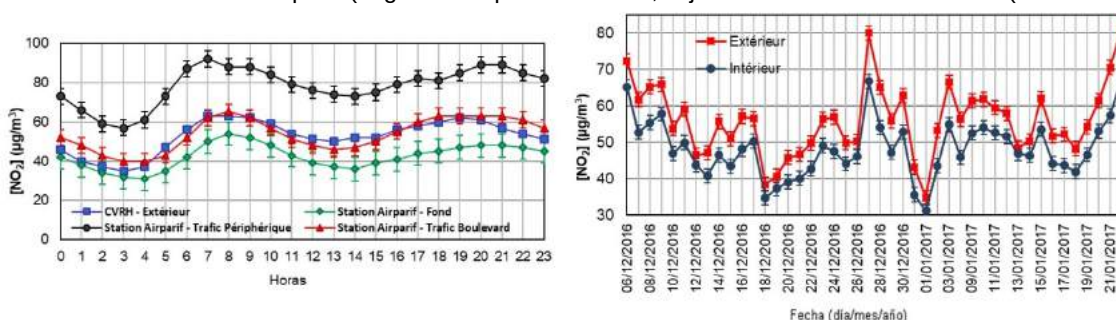
La contaminación del aire en interiores es un problema de salud pública. Según un estudio reciente realizado por la Anses, esta contaminación generaría en Francia un costo socioeconómico de unos 20.000 millones de euros al año (Anses, 2014). Además, el tratamiento del aire interior en espacios comunes se ha convertido en un problema importante. Para responder a las preguntas planteadas por la calidad del aire es necesario, paralelamente a los esfuerzos de reducción de las emisiones en origen (optimización de la ventilación, utilización de materiales menos emisivos, etc.), interesarse por cualquier sistema de tratamiento del aire que se pueda implantar. En este contexto, el proyecto multidisciplinar CUBAIR, financiado por la Agencia Francesa del Medio Ambiente y la Gestión de la Energía (ADEME), en el marco de la convocatoria de proyectos "Hacia edificios responsables para el 2020", tenía por objeto desarrollar y estudiar un prototipo original, integrado en el sistema de ventilación que abastece a una sala de convivencia de un edificio en el sector terciario en París, el CVRH (Centro de Valorización de Recursos Humanos). Se evaluó *in situ* el rendimiento de este innovador prototipo que combina la adsorción, filtración y fotocátalisis como técnicas de purificación del aire.

Inicialmente, se realizaron pruebas en el laboratorio con el fin de proporcionar recomendaciones y elementos de diseño para la implementación del prototipo en condiciones reales. Antes de su puesta en servicio, se realizó una caracterización de la calidad del aire interior del CVRH entre mayo de 2016 y marzo de 2017 (incluyendo las

estaciones de verano e invierno), analizando diferentes gases contaminantes (NOX, BTEX, COV total, formaldehído), partículas finas (PM₁₀, PM_{2.5} y PM₁) y parámetros microbiológicos (bacterias, moho, endotoxinas). Estos datos se compararon con datos medidos al exterior del CVRH y con los reportados por las estaciones de medición de la red de monitoreo de calidad del aire de París (AIRPARIF), lo que permitió destacar la transferencia de contaminantes del exterior hacia el interior, resaltando los contaminantes provenientes de fuentes móviles tales como los NOX (Fig. 1a y 1b) y las partículas finas.

Los otros parámetros evaluados tenían concentraciones comparables a las de los ambientes de oficina con ventilación y se mantuvieron por debajo de los valores de referencia recomendados (formaldehído y benceno en particular).

Fig. 1. a) Óxidos de nitrógeno: comparación de las concentraciones del CVRH en exteriores (azul) con las estaciones de Airparif (negro en el periférico Este, rojo en el boulevard Massena (Paris 13^{ème}, France) y verde el fondo: Paris 13^{ème}). b) Óxidos de nitrógeno: transferencia del aire exterior (rojo) al interior (azul).



France) y verde el fondo: Paris 13^{ème}). b) Óxidos de nitrógeno: transferencia del aire exterior (rojo) al interior (azul).

2. Materiales y métodos

El prototipo estudiado integra tres técnicas de purificación del aire (Fig. 2): la adsorción, que se realiza a través de un filtro de carbón activado, la filtración (filtro grueso G4 y filtro fino F7) y la oxidación fotocatalítica, que se asegura mediante la activación de moléculas de dióxido de titanio (TiO₂) utilizando una fuente de luz en el rango UV. El aire exterior pasa a través de una unidad de tratamiento de aire que permite una filtración mecánica sencilla de las partículas más grandes con el uso de un filtro G, antes de ser soplado en la sala de convivencia de la CVRH de un volumen aproximadamente igual a 230 m³. Enseguida, el aire es dirigido al prototipo usando un ventilador (Fig. 2). El aire pasa inicialmente por un primer filtro compuesto por tres tipos de carbones activados de diferentes características (CA) de la sociedad Carbio 12 (Carnoux en Provence, France), el C1220 G90; el C1220 IG93/102 y el IGC1220 IG 93Mn), luego por dos filtros mecánicos de tipo G4 y luego F7 para la eliminación de partículas gruesas (PM₁₀) y finas (PM_{2.5}). Finalmente, el aire es tratado por la fotocatalisis antes de ser liberado de nuevo a la sala con un flujo promedio de 70 m³/h.

El rendimiento del prototipo en el tratamiento de parámetros químicos (NO_x , Ozono, Aldehídos, COV), físicos (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10}) y microbiológicos (bacterias y hongos) fue evaluado y estudiado desde mayo de 2017 hasta febrero de 2018. Se estudiaron tres puntos de muestreo para los diferentes análisis físico-químicos: a la entrada del prototipo (entrada del filtro CA), después del filtro CA y los filtros G4 y F7, es decir, a la entrada del fotocatalizador y, a la salida del prototipo (Fig. 2).

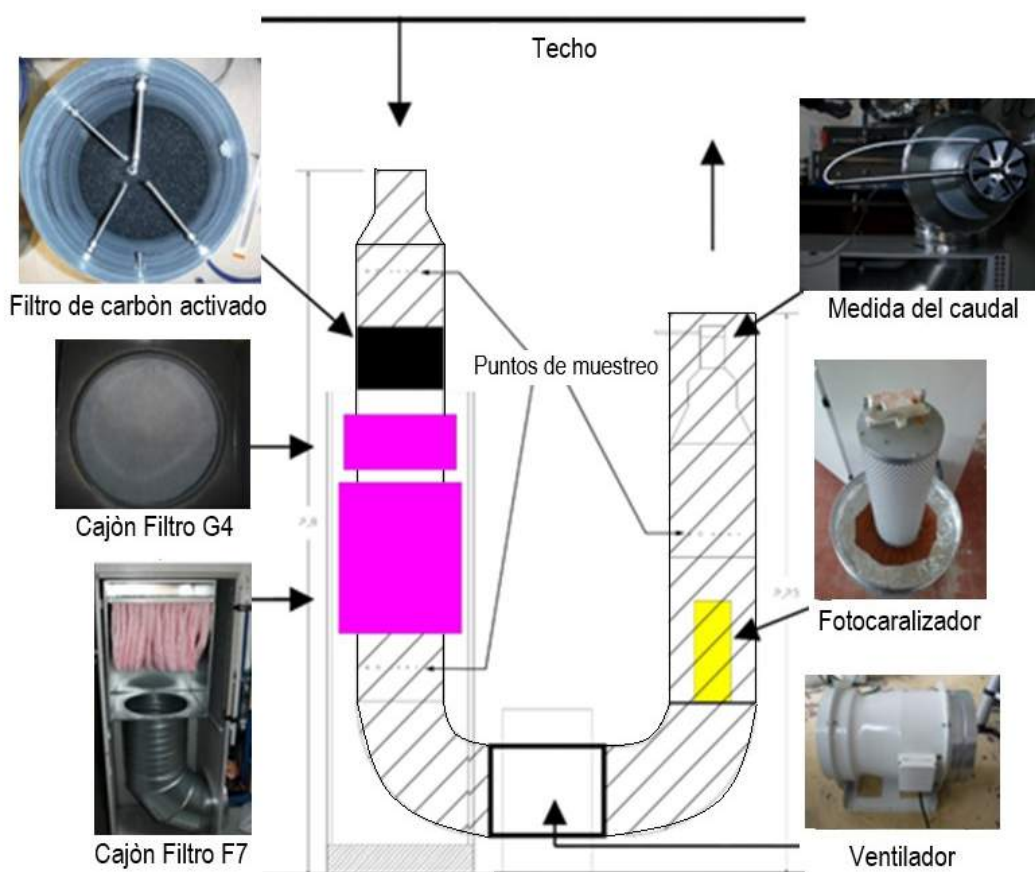


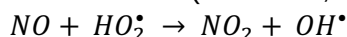
Fig. 2. Prototipo que integra tres técnicas de purificación del aire (adsorción, filtración y fotocatalisis).

3. Resultados y discusión

La combinación de diferentes técnicas de purificación del aire muestra eficiencias de tratamiento muy interesantes, especialmente para los óxidos de nitrógeno y más concretamente para el NO_2 , con una reducción media del 86% durante el periodo comprendido entre septiembre de 2017 y febrero de 2018. La caracterización de los diferentes puntos de muestreo en el prototipo de tratamiento del aire (entrada, intermedio y salida) también reveló una cierta complementariedad de la adsorción junto con la fotocatalisis (particularmente en el caso de los óxidos de nitrógeno (Fig. 3). Cuando los procesos de adsorción de carbón activado eliminan el NO_2 (Fig. 3a y 3b), la fotocatalisis tiene un mayor efecto en la eliminación de NO (Fig. 3c y 3d). La Fig. 3b muestra que las dos curvas (intermedia y de salida) se superponen. El proceso

fotocatalítico está por lo tanto en el origen de la formación de NO_2 entre el punto intermedio y la salida (Fig. 3a).

Por otro lado, no hay correlación entre el flujo intermedio de NO_2 y su reducción al final del prototipo. Una hipótesis considerada es que el NO que entra en el sistema reacciona con el ión hidroperoxilo ($\text{HO}_2^\bullet$) formado durante el proceso fotocatalítico y luego se transforma en NO_2 tras la reacción (Fan et al., 2018; Guo et al., 2018):



Las etapas de tratamiento implican, por tanto, diferentes mecanismos físico-químicos que favorecen la eliminación de NO o NO_2 según el proceso utilizado. Los resultados para los demás compuestos gaseosos (aldehídos, incluidos el formaldehído y los COV) deben calificarse. La Fig. 4 muestra que el formaldehído, el acetaldehído y la acetona tienen concentraciones más altas a la salida que a la entrada del prototipo lo que no es el caso para los dos COVs: N-Nonanal y N-Decanal). Esto puede atribuirse a la presencia de la fotocatalisis en la salida del prototipo.

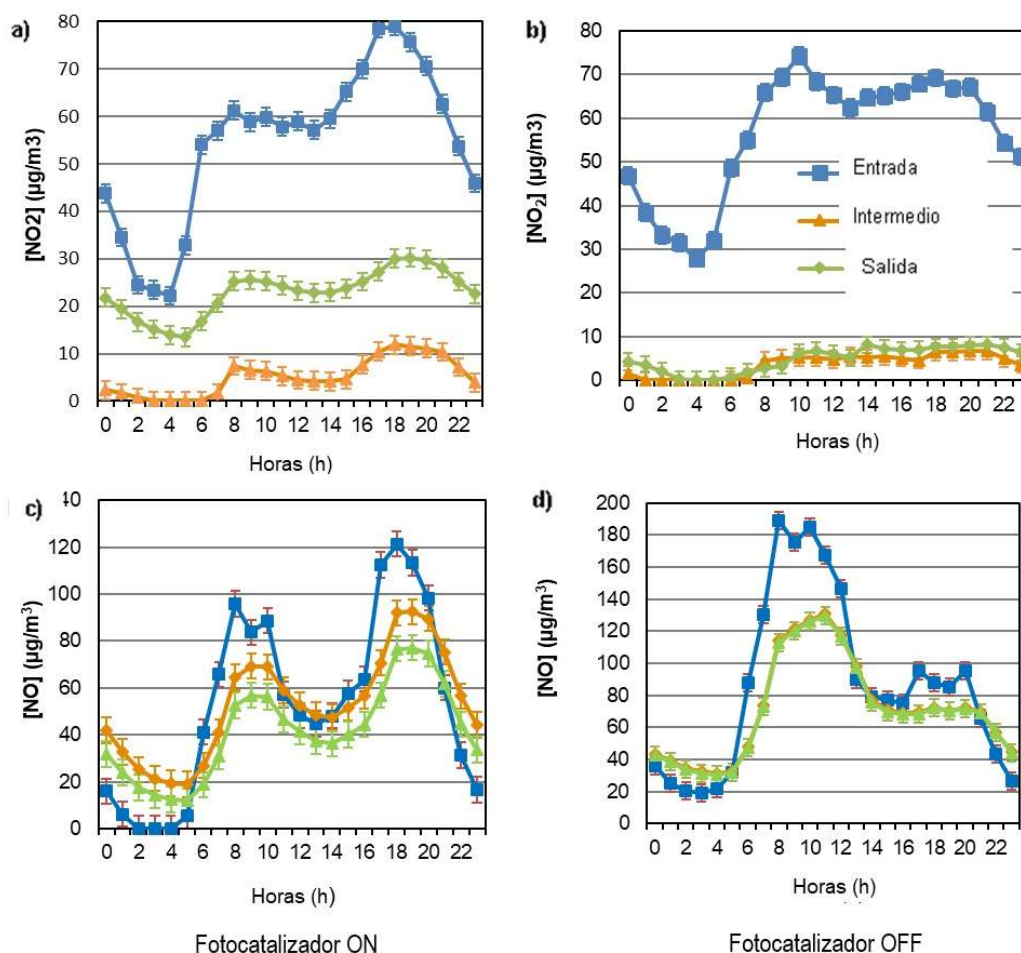


Fig. 3. Evolución horaria de las concentraciones de dióxido de nitrógeno (a y b) y monóxido de nitrógeno (c y d) con el fotocatalizador en funcionamiento (a y c) y en parada (b y d).

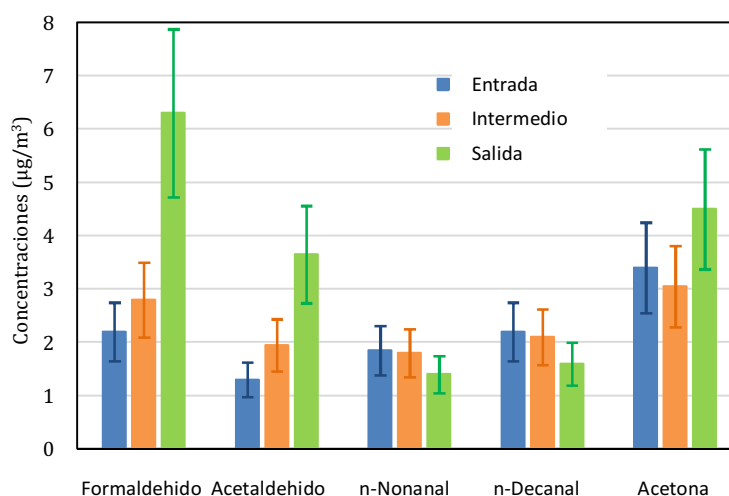


Fig. 4. Evolución de las concentraciones de algunos COVs entre el punto de la entrada, el intermedio y de la salida del prototipo.

Los principales resultados obtenidos en partículas muestran que la clase mayoritaria de partículas en el punto intermedio y en el final del prototipo es la de PM₁, así como al principio del prototipo. Las clases de partículas inferiores a 1.0 µm de diámetro y las comprendidas entre 1.0 y 2.5 µm representan, por tanto, entre el 93 y el 97% de las partículas presentes en el flujo de aire. La presencia de un filtro tipo G4 (en la unidad de tratamiento de aire en el techo) antes de la entrada del prototipo de tratamiento de aire y un segundo G4 asociado a un filtro tipo F7 después del filtro de carbón activado permiten la eliminación de las partículas más grandes. El prototipo permite una reducción de más del 75% de PM₁ (Fig. 5).

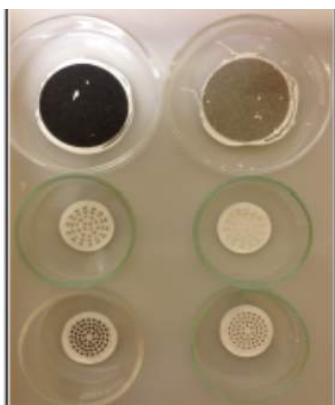


Fig. 5. Filtros recogidos en 2 semanas. A la izquierda la entrada y a la derecha la salida del prototipo. PM menos de 1 µm (alto), de 1 a 2.5 µm (medio) y de 2.5 a 10 µm (abajo)

En cuanto a la presencia de microorganismos, los resultados microbianos contados en el aire ambiente de la sala de convivencia son los obtenidos tradicionalmente en ambientes interiores. La concentración de aerosol microbiano al final del prototipo estaba por debajo del límite de cuantificación (< 10 CFU/m³). Por lo tanto, parece que el fotocatalizador destruye eficazmente los microorganismos presentes de forma natural en el flujo de aire. En el caso del carbón activado, los resultados del recuento microbiano fueron bajos. Se realizó una medición del contenido de humedad (en masa) en el carbón activado y se estimó en $17.92 \pm 0.48\%$. Por lo tanto, el carbón activado presente en el prototipo de tratamiento de aire puede considerarse como seco, lo que concuerda con su característica de medio hidrofóbico. En este sentido, la ausencia de colonización del carbón activado por parte de los microorganismos se asevera como lógica ya que éstos necesitan agua para crecer.

4. Conclusiones

El prototipo de tratamiento de aire utilizado en el presente estudio ha demostrado una importante eficacia en la eliminación de material particulado (reducción de PM_{10} mas del 75%), gracias a la presencia de los dos filtros G4 y F7, principalmente.

La caracterización del prototipo de tratamiento del aire con los diferentes puntos de muestreo también reveló una cierta complementariedad para dos técnicas estudiadas: el filtro de carbón activado y la fotocatálisis (especialmente en el caso de los óxidos de nitrógeno). El carbón activado elimina el dióxido de nitrógeno (NO_2) y la fotocatálisis tiene un mayor efecto en la eliminación del monóxido de nitrógeno (NO). La existencia de un punto intermedio de muestreo entre la primera parte del tratamiento (adsorción-filtración) y la segunda (fotocatálisis) también permite realizar diversas hipótesis sobre los mecanismos físico-químicos implicados durante el tratamiento y ofrecer recomendaciones sobre el funcionamiento del sistema.

Adicionalmente, estas pruebas in situ (en condiciones reales) plantean la necesidad del uso de un segundo filtro de carbón activado ubicado a la salida del fotocatalizador para ayudar a reducir al máximo las emisiones de compuestos secundarios a la salida total del dispositivo.

5. Referencias

ANSES (2014). Etude exploratoire du coût socio-économique des polluants de l'air intérieur. Rapport d'étude. <http://www.anses.fr/en/documents/AUT-RaCoutAirInterieurSHS2014.pdf>
(fecha de consulta: 26 June 2014)

Fan, W., Chan, K.Y., Zhang, C., Zhang, K., Ning, Z. y Leung, M.K.H. 2018. Solar photocatalytic asphalt for removal of vehicular NO_x : A feasibility study. Applied Energy. 225, 535–541.

Guo, M.Z., Chen, J., Xia, M., Wang, T. y Poon, C.S. 2018. Pathways of conversion of nitrogen oxides by nano TiO_2 incorporated in cement-based materials, Building and Environment, 144, 412–418.