

# ESPECTROMETRÍA INFRARROJA CON ARRAY DE FOTODETECTORES

J. A. Chávez, J. A. Ortega, J. Alba y M. García

**E**l reciente desarrollo de la tecnología de los dispositivos integrados está permitiendo la compactación de los equipos de detección de gases. En nuestro caso fruto del diseño de un array de fotodetectores de PbSe con filtros adosados al mismo para la medida de la radiación infrarroja en el margen de  $3\ \mu\text{m}$  a  $5\ \mu\text{m}$  se ha desarrollado la primera versión de un equipo que permite la detección de hasta 19 gases contaminantes.

## 1. INTRODUCCIÓN

La aplicación de las normativas europeas y nacionales en cuestiones medioambientales ha generado una serie de líneas de investigación orientadas en dos direcciones básicas. Una, la in-

vestigación y desarrollo de nuevos sistemas de reducción de la contaminación emitida por la industria, los medios de transporte, sistemas de calefacción, etc., mediante la mejora de su diseño o introduciendo sistemas de filtrado y depuración. La otra dirección abarca la investigación y desarrollo de sistemas que permitan detectar y cuantificar las emisiones contaminantes, con el objeto de poder comprobar el cumplimiento de las normas. Dentro de este último marco nació el proyecto GAME: Sistema Integrado para la Gestión MedioAmbienta

l SIGMA (este trabajo ha recibido el soporte económico del convenio CTT-C1666).

El proyecto SIGMA se concibió como una colaboración entre la empresa y la universidad para el desarro-

llo de un sistema capaz de recoger información de temperatura, presión, concentraciones de gases, etc., en multitud de puntos repartidos por un amplio territorio, y ofrecer periódicamente información sobre el estado de la atmósfera, incluyendo predicciones, alarmas y bases de datos. El sistema, desarrollado y entregado, está configurado jerárquicamente, ver Fig. 1.

El grupo formado por los firmantes de este artículo junto con un grupo de trabajo de la Universidad Carlos III de Madrid, se encargó de diseñar y desarrollar un equipo para la medi-

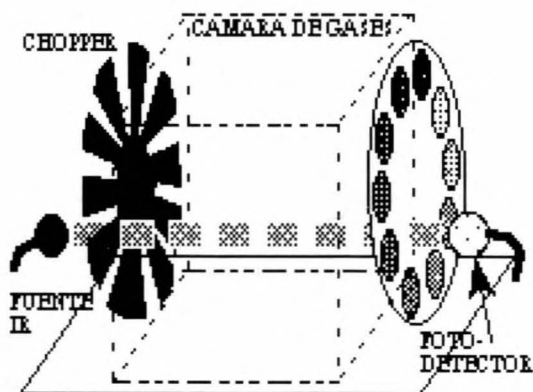
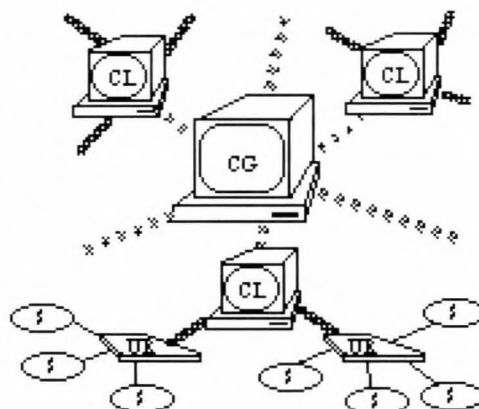


Figura 2.- Esquema básico del principio de medida de un espectrógrafo basado en rueda de filtros.

da de gases contaminantes basado en la espectrometría infrarroja.

## 2. ESPECTROMETRÍA INFRARROJA.

La espectroscopía de infrarrojos se eligió entre todas las técnicas disponibles<sup>3</sup> ya que es sensible, selectiva, tiene un rápido tiempo de respuesta y una alta inmunidad a los interferentes. También es una ventaja de este método que no son necesarios materiales consumibles y por tanto los costes de mantenimiento y vigilancia son reducidos.

Sólo hay interacción entre el gas y la onda electromagnética si éste está formado por moléculas con momento dipolar eléctrico distinto de cero. Así, los gases monoatómicos, por ejemplo el helio (He), y los formados por moléculas homonucleares, como el nitrógeno (N<sub>2</sub>), no interactúan con la luz infrarroja.

Cada gas tiene un espectro de absorción diferente. Se reconoce un gas cuando se detecta que la luz ha sufrido una absorción en una o varias zonas del espectro donde sólo ese gas puede estar presente.

Se suelen dividir los sistemas de detección de gases con infrarrojos en: dispersivos (DIR) y no dispersivos (NDIR).

Los analizadores de gases DIR se basan en la difracción de un haz de luz infrarroja incoherente por un prisma, posteriormente colimado para elegir una banda estrecha en la que el componente gaseoso absorba y otra en la que no. La diferencia de intensidad entre

ambos haces es una medida de la concentración del gas analizado.

Los NDIR también realizan una medida diferencial pero con una configuración más robusta. Utilizan dos haces de luz, uno que pasa a través de la cámara por la que fluye el gas a analizar y otro haz que pasa por una cámara donde no se produce absorción. Es el método más utilizado en la industria.

### 2.1. ESPECTROMETRÍA IR CON RUEDA DE FILTROS.

Si en lugar de un sólo gas se desean analizar varios se suele utilizar, ver figura 2, un emisor incoherente de luz infrarroja, que es modulado en amplitud con una rueda dentada (CHOPPER) para modular la

intensidad de la radiación que el ruido a baja frecuencia es del tipo  $1/f$ , y una rueda con filtros que gira de forma que se obtiene un espectro discreto. Uno de los filtros se reserva para hacer de referencia en una zona del espectro donde no hay radiación.

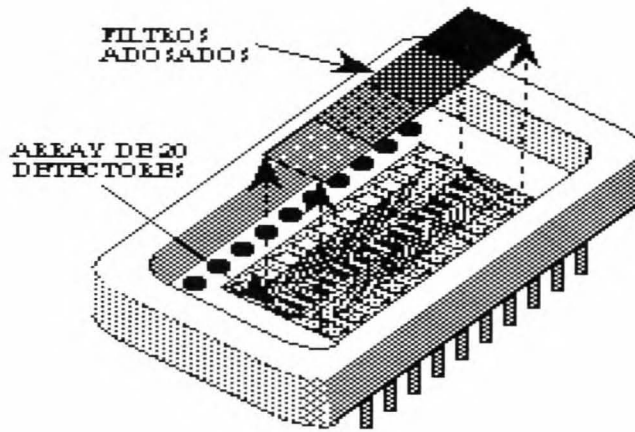
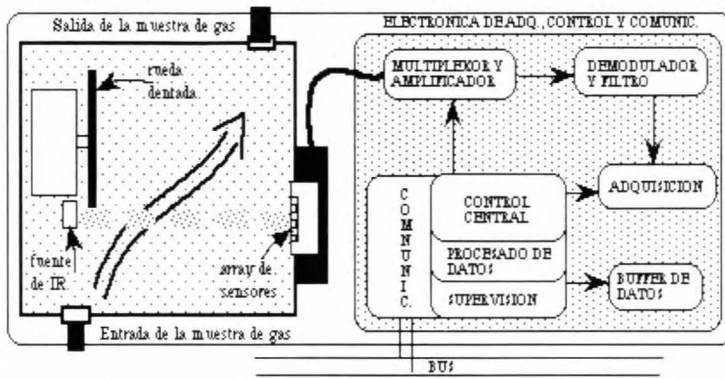


Figura 3.- Vista del array de detectores con filtros adosados.

Los sistemas que contienen partes móviles presentan diversos inconvenientes entre ellos destacan: el tiempo mínimo necesario para realizar la adquisición y cálculo de un espectro completo; la sincronización en la adquisición; el coste de la mecánica; el espacio requerido; el ruido que introducen, ya que son fuentes de calor al tener motores.

### 2.2. ARRAY DE SENSORES CON FILTROS ADOSADOS.

El avance de la tecnología permite ha permitido el desarrollo integrado de un array de fotodetectores en el infrarrojo con filtros a diferentes longitudes de onda<sup>1</sup> a un precio que actualmente es comparable a los sistemas con partes móviles. En la figura 3 se presenta una vista en perspectiva del sensor utilizado. Consta de 20 elementos detectores de PbSe alineados<sup>4,5</sup>. El array también tiene adosados enfriadores Peltier para reducir la temperatura de trabajo del sensor y con ello reducir el ruido y aumentar la detectividad del mismo. Adosados a la cara superior se encuentran los filtros paso banda centrados cada uno de ellos a una frecuencia diferente. Existe un filtro de referencia a una longitud de onda donde no se produce absorción. Por motivos que se verán



**Figura 4.**- Esquema de un espectrógrafo basado en array de fotodetectores con filtros adosados

más adelante también se puede adosar un filtro que no deje pasar radiación para tener una medida del offset de los sensores en cada medida.

Este nuevo sistema permite la compactación del equipo y por tanto su portabilidad. Con el que se pretendía aplicar la nueva tecnología desarrollada, la construcción de arrays de detectores con filtros adosados, a un sensor inteligente para la detección de gases contaminantes. En la figura 4 se observa un esquema del equipo diseñado para el proyecto SIGMA<sup>2</sup>.

Debido a problemas en el desarrollo<sup>1</sup> de la tecnología de crecimiento de los filtros hasta ahora solo se ha conseguido realizar 5 diferentes. En el momento de poner a punto el equipo realizado solo se disponía de 3 filtros, uno reservado siempre como referencia y 2 para medir 2 gases.

### 2.3. DIFRACCIÓN IR Y ARRAY DE SENSORES

En el array de fotodetectores con filtros adosados el haz de IR es dispersado por igual a todos los elementos de forma que antes de pasar por los filtros la intensidad recibida se ha reducido considerablemente provocando que la relación SNR disminuya.

La nueva versión del espectrógrafo de gases esta basada en la difracción del haz de luz de forma que hace innecesaria la presencia de filtros, ver figura 5,

esto nos permitirá desarrollar la electrónica y el procesado necesario para el análisis de muchos gases a la vez. Cuando se haya optimizado el diseño del array con filtros el sistema estará preparado.

Se hace un paso a frecuencia intermedia muy baja,  $f_0$ , de forma que se pueden convertir todos los canales a digital a una velocidad baja y procesar las muestras en tiempo real.

### 3. IDENTIFICACIÓN DE LOS GASES.

Del total de elementos presentes en el array,  $M$  se dedican a la medida en diferentes zonas del espectro. O sea, que cada uno de ellos tiene adosado un filtro paso banda en centrado en una longitud de onda de interés. La distribución de estos filtros no ha de ser equiespaciada sino que se adapta a los picos de absorción de los gases que se desean detectar<sup>1</sup>. Una medida realizada en el array se podría representar, cuando se de-

$$\begin{aligned}
 V_{C1} &= V_{S1} \left[ 1 - (\beta_{11} + \beta_{1j} + \beta_{1N}) \right] + V_{O1} \\
 V_{C2} &= V_{S2} \left[ 1 - (\beta_{21} + \beta_{2j} + \beta_{2N}) \right] + V_{O2} \\
 V_{Ci} &= V_{Si} \left[ 1 - (\beta_{i1} + \beta_{ij} + \beta_{iN}) \right] + V_{Oi} \\
 V_{CM} &= V_{SM} \left[ 1 - (\beta_{M1} + \beta_{Mj} + \beta_{MN}) \right] + V_{OM}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

sean calcular las concentraciones de  $N$  gases diferentes, con el siguiente sistema de ecuaciones:

donde,  $V_{Ci}$  es la tensión medida en el elemento  $i$ -ésimo del array cuando hay gases contaminantes;  $V_{Si}$  es la tensión que se mediría en el elemento  $i$ -ésimo del array si en la cámara no hubiera ningún gas que presentase absorción en las bandas filtradas;  $V_{Oi}$  es la tensión de offset medida en el elemento  $i$ -ésimo; y  $b_{ij}$  es la absorción debida al gas  $j$ -ésimo en el elemento  $i$ -ésimo, variando esta magnitud entre 0 y 1.

La relación que rige entre la intensidad de radiación detectada a una determinada frecuencia, tras atravesar un gas con momento dipolar diferente de cero, viene dada por la ecuación de Lambert-Beer, (2).

$$I = I_0 e^{-\xi cs} \tag{2}$$

donde,  $I$  es la intensidad de radiación incidente;  $I_0$  es la intensidad de luz emitida;  $\xi$  es el coeficiente de absorción (depende de la longitud de onda y del gas en cuestión);  $c$  es la concentración de gas ( $\text{g}/\text{m}^3$ ); y  $s$  es la distancia recorrida por el haz de luz.

Teniendo en cuenta que la concentración de los gases contaminantes será baja la atenuación sufrida por el haz de luz<sup>1</sup> es muy pequeña, por lo que la ecuación de Lambert-Beer se puede aproximar linealmente, ecuación (3), y por tanto considerar la absorción proporcional a la concentración de gas, con constante de proporcionalidad  $b_{ij}$ , ecuación (4).

$$I \approx I_0 (1 - \xi cs) \tag{3}$$

$$\beta_{ij} \approx b_{ij} c_j \tag{4}$$

Según (4) y sabiendo que el sistema de demodulación está basado en un PLL que engancha con la frecuencia del chopeado para anular con lo que la tensión me-

didada no tendrá contribución del offset, el sistema de ecuaciones marcado con (1), queda de la forma que se puede ver en la página siguiente.

$$V_{Ci} = V_{Si}(1 + \alpha_1) \left[ 1 - \sum_{j=1}^N b_{1j} c_j \right]$$

$$V_{Ci} = V_{Si}(1 + \alpha_i) \left[ 1 - \sum_{j=1}^N b_{ij} c_j \right]$$

$$V_{CM} = V_{SM}(1 + \alpha_M) \left[ 1 - \sum_{j=1}^N b_{Mj} c_j \right]$$

(5)

El término  $(1 + \alpha_j)$  tiene en cuenta las derivas temporales que sufre la medida. Para reducir este efecto se ha de utilizar un elemento con un filtro a una longitud donde no haya absorción como referencia y suponer que las derivas son iguales en todos los elementos del array, o sea, que:

$$\alpha_1 = \alpha_j = \alpha_M = \alpha$$

$$V_{CREF} = V_{SREF}(1 + \alpha_{REF}) \left[ 1 - \sum_{j=1}^N b_{REFj} c_j \right]$$

$$= V_{SREF}(1 + \alpha) \Rightarrow 1 + \alpha = \frac{V_{CREF}}{V_{SREF}}$$

↓

$$b_{REFj} = 0$$

$$\forall j = 1..N$$

(6)

Teniendo en cuenta (6), el sistema de ecuaciones, (5) queda:

$$\frac{V_{SREF}}{V_{OREF}} \frac{1}{k} \begin{bmatrix} V_{C1} \\ V_{S1} \\ \vdots \\ V_{CM} \\ V_{SM} \end{bmatrix} = \frac{1}{I} \begin{bmatrix} 1 & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{11} & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{M1} & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_N \end{bmatrix} \downarrow \underline{c}$$

(7)

Si  $M=N$ :

$$\underline{c} = \underline{B}^{-1}(\underline{I} - k\underline{a}) \quad (8)$$

Si se eligen la posición de los filtros de forma que no haya absorciones cruzadas, la concentración se puede calcular fácilmente:

$$c_i = \frac{1}{b_{ii}} \left( 1 - \frac{V_{SREF}}{V_{Si}} \frac{V_{Ci}}{V_{CREF}} \right) \quad \forall i = 1..N$$

↓  
cte

(9)

Por tanto, calibrando el sensor para hallar las constantes  $b_{ii}$  y  $V_{SREF}/V_{Si}$ , para hallar las concentraciones de  $N$  gases hay que hacer  $N+1$  medidas.

#### 4. CONCLUSIONES

El sistema diseñado para el convenio GAME basado en la espectrometría de IR con array de fotodetectores de PbSe y filtros adosados ha demostrado su viabilidad<sup>2</sup>. Esta tecnología junto con un diseño más compacto de la cámara, la

mejora en el procesado permitirán y su menor coste permitirán en un futuro cercano la difusión de los detectores de gases contaminantes en aquellas zonas de mayor peligro.

#### 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. López, J. de Frutos, «Multiespectral interf. filters and their application to the design of compact non-dispersive infrared gas analysis for pollution control», Sensors and Actuators A, 37-38, pp. 502-506, 1993.
- [2] J.A. Ortega Redondo, J.A. Chavez, J. Alba y M. García, «Sensor inteligente para la detección de gases medioambientales», Seminario anual de automática e instrumentación, pp. 137-154, Diciembre 1986
- [3] J. Chas, «Analizadores de gases», Automática e instrumentación, pp. 137-154, Diciembre 1986.
- [4] T.H. Johnson et al. «Lead selenide detector arrays», IRIS Vol. 13, No.1, 1969.
- [5] D.E. Bode, «Lead selenide detectors for intermediate temperature operation», Appl. Optics, Vol4, No. 3, 1965.
- [6] S.Zaromb et al., «Theoretical basis for identification and measurement of air contaminants using an array of sensors having partly overlapping selectivities», Sensors and Actuators, pp. 225-243, 6(1984).

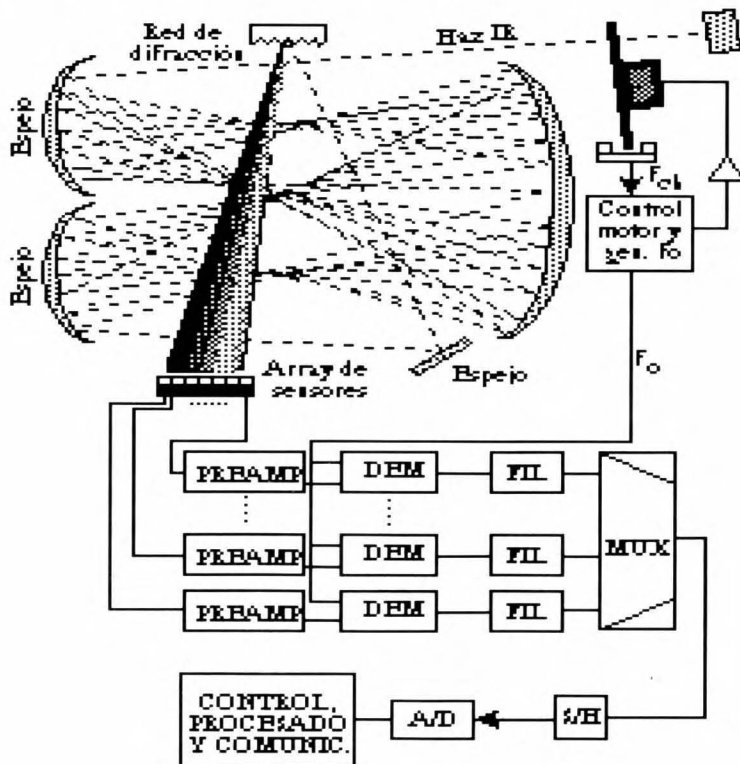


Figura 5.- Nuevo sistema de espectrografía IR de gases.