

# CAPÍTULO 5

## *Conclusiones*

## 5. Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo ha sido el proponer mejoras y soluciones novedosas con vistas a minimizar las deficiencias fundamentales que presentan los sistemas de olfato electrónico actuales, tales como la falta de selectividad, la falta de sensibilidad y la falta de metodología que permita optimizar el diseño de un sistema de olfato electrónico para una aplicación concreta. Es necesario destacar que hasta la fecha este tipo de limitaciones son las responsables principales del freno a la expansión de este tipo de instrumentos hacia aplicaciones en los sectores agroalimentarios e industriales.

Para poder remediar estas deficiencias se han desarrollado tres estudios paralelos que han tratado de mejorar otros tantos subsistemas fundamentales en este tipo de instrumentos (sistema de muestreo, sistema de medición y sistema de reconocimiento de patrones).

☛ En el primero de los estudios se ha podido constatar que la incorporación de técnicas de selección de variables en el sistema de reconocimiento de patrones de un instrumento para la detección de micro-organismos en productos de panadería industrial ha permitido mejorar notablemente la resolución del equipo.

En este caso, la selección de variables se asoció directamente a cada uno de los sensores, puesto que de cada sensor solo se extrajo un parámetro. Esto permitió encontrar la configuración óptima de la matriz de sensores, ya que directamente (con el método "forward selection") se pueden identificar los sensores que aportan información útil y, sobre todo, se pueden eliminar aquellos dispositivos que lo único que hacen es entorpecer el funcionamiento del sistema ya que solo introducen información aleatoria no correlacionada con el problema de clasificación (ruido).

Lo más importante del estudio fue descubrir como las diferentes técnicas de selección de variables influyen enormemente en los resultados obtenidos. Cabe recalcar que este descubrimiento se ha encontrado en una aplicación con un interés industrial indiscutible.

Hay que recordar que, pese a haber diseñado y optimizado cada uno de sus subsistemas para la aplicación mencionada, los resultados iniciales no fueron nada favorables al tratar de identificar estos micro-organismos. Sin embargo, con el uso de técnicas de selección de variables fue posible incrementar los aciertos hasta valores que permiten mirar con optimismo al futuro de este tipo de aplicaciones. Los resultados obtenidos en este trabajo

han sido publicados en el principal congreso sobre sistemas de olfato electrónico (ISOEN 2005) con una presentación oral. Por otro lado, a raíz del mismo, se ha redactado un artículo de mayor extensión para ser evaluado para su publicación en la revista *Sensors & Actuators*. Al cierre de esta memoria aún no hemos obtenido el comentario de los revisores sobre el mismo. En el anexo A se puede consultar la contribución al congreso y en el anexo B el “full paper” enviado a la revista.

El tema de la selección de variables ha visto incrementado su interés enormemente en este último año, ya que la mayoría de los investigadores se han percatado de la importancia de seleccionar los sensores y las variables adecuadas a cada aplicación. Se puede afirmar, sin ningún tipo de problema, que este fue el tema estrella en el último congreso internacional sobre sistemas de olfato electrónico (ISOEN 2005). En nuestro grupo de investigación los resultados obtenidos en este trabajo propiciaron, hace ya algún tiempo, el inicio de una tesis doctoral exclusivamente dedicada a la selección de variables en sistemas de olfato electrónico, tesis que ha tomado como punto de partida los resultados obtenidos en este trabajo.

- ☛ El segundo trabajo que se incluye en esta memoria ha estado motivado por una necesidad real de una empresa gasística. Esto ya de por sí es poco habitual en el mundo de los sistemas multisensores basados en sensores de óxidos metálicos. El estudio realizado se ha centrado en intentar incrementar de forma espectacular la sensibilidad del sistema frente a un contaminante concreto, siendo su principal novedad el que el gas portador fuese CO<sub>2</sub>, ya que hasta la fecha todo sistema de pre-concentración ha utilizado portadores con suficiente oxígeno para que los sensores semiconductores pudiesen reaccionar ante la presencia de volátiles.

A través del diseño, construcción y acoplamiento de una unidad de desorción térmica a un sistema multisensor fue posible aumentar la sensibilidad y selectividad del equipo a la vez, obteniendo resultados verdaderamente espectaculares, ya que la sensibilidad del equipo se ha incrementado por un factor cercano a 500 de forma repetitiva.

Hay que destacar que en el transcurso de las primeras medidas hubo problemas considerables al intentar conseguir la configuración óptima del equipo. Sin embargo, al final, con un gran número de pruebas experimentales, fue posible llegar a la configuración óptima para la aplicación comercial objeto del estudio.

Con esta configuración se lograron detectar niveles de 10 ppb de benceno bajo un flujo de CO<sub>2</sub> puro, aumentando considerablemente la sensibilidad

del sistema de olfato electrónico ya que en las pruebas preliminares se había constatado que la sensibilidad del equipo frente al benceno sin pre-concentración estaba en torno a 5 ppm.

Además de incrementar espectacularmente la sensibilidad, la unidad de desorción térmica permitió incrementar la selectividad del sistema ya que no adsorbe el resto de interferentes presentes en el flujo de CO<sub>2</sub>, potenciando exclusivamente las trazas de benceno.

Es también importante destacar que a pesar de haber estado realizando medidas con benceno, CO<sub>2</sub> e interferentes durante casi un año de trabajo continuo, los sensores usados para la aplicación no sufrieron ningún tipo de desperfecto.

Un aspecto importante que diferencia este estudio frente a otros parecidos publicados en la literatura científica, es su directa aplicabilidad industrial. Por este motivo, este primer prototipo debe ser evaluado extensamente en condiciones de uso habitual, y se pretende seguir perfeccionando para que acabe siendo un equipo comercial. Además, este trabajo ha generado una publicación enviada a una revista internacional.

Aunque los resultados obtenidos han sido muy esperanzadores, hay que destacar que existe mucho margen para seguir investigando en el campo de los concentradores y la desorción térmica acoplada a sistemas multisensores. Por ejemplo, deben ser estudiados y caracterizados otros adsorbentes para cada compuesto que se pretenda concentrar.

Dentro de las ideas que se pretenden desarrollar en un futuro próximo destacan dos:

- La generación de rampas de temperatura en el absorbente, que puede producir un efecto similar al de una columna cromatográfica. Los primeros estudios realizados parecen indicar que se trata de una línea de investigación con futuro y que puede incrementar considerablemente la selectividad del equipo al trasladar al eje temporal la separación de componentes individuales en una mezcla gaseosa.
- La otra posibilidad es la de rellenar los tubos de desorción térmica con diferentes adsorbentes que pueden ser calentados en etapas diferentes, con lo que de nuevo se trasladaría el problema de la separación de componentes al eje temporal mediante un sencillo sistema de calentamiento por secciones.

- ☛ El tercer tema tratado en esta tesis doctoral versa sobre la incorporación de un mecanismo de modulación de flujo a un sistema de olfato electrónico. Esta aproximación es una novedad total en cuanto a la forma de extraer parámetros dinámicos de la respuesta de los sensores. Además, la implementación del equipo mediante una bomba peristáltica de bajo coste incrementa el interés de la aproximación. Hay que resaltar que todo el equipo fue diseñado y construido a partir de módulos comerciales de bajo coste que permitirían un cambio de configuración rápida si se tuviese que adaptar a una aplicación concreta.

En el trabajo realizado se ha demostrado que la modulación de flujo aporta información adicional a la ofrecida por parámetros estáticos o incluso por la varianza de la señal. Para ello se han hecho estudios en los que se han anulado estas dos fuentes de información obteniendo éxitos de clasificación tres veces superiores a los que se esperaría de haberse realizado al azar. Por ese motivo se puede afirmar con total rotundidad que esta aproximación incrementa la selectividad de cada uno de los sensores utilizados (todos ellos sensores semiconductores comerciales).

Al final, fruto de este trabajo, se ha presentado un póster al congreso IEEE sensors y al mismo tiempo se ha redactado una publicación que se ha enviado a la revista *Sensors & Actuators B* que en estos momentos está en proceso de revisión. Ambas contribuciones se incluyen en los anexos posteriores a este capítulo.

Es importante destacar que este trabajo abre una nueva línea de investigación en la que se deben probar multitud de compuestos gaseosos, diferentes formas de onda, diferentes frecuencias y diferentes métodos de selección de variables junto a métodos de pre-procesado y de algoritmos de reconocimiento de patrones. Por lo tanto, podemos afirmar nuevamente que este estudio es pionero y abre un mundo de posibilidades en cuanto a la integración de este mecanismo de medida en multitud de sistemas de olfato electrónico diseñados para aplicaciones de bajo costo.

Un paso posterior a los tres estudios reportados en esta memoria consistiría en la integración en un mismo equipo de todas las soluciones propuestas y evaluadas, lo cual debería incrementar la efectividad global del sistema de olfato electrónico hasta convertirlo en un instrumento útil en aplicaciones agroalimentarias. Cabe destacar que las tres estrategias propuestas pueden ser implementadas con un bajo presupuesto económico ya que no requieren de elementos sofisticados (en los tres trabajos descritos en esta memoria el subsistema en estudio ha sido fabricado en nuestros propios laboratorios). Esto

implica que el incremento en operatividad del sistema no estaría reñido con el coste económico del equipo.

En definitiva, tras la finalización de esta tesis doctoral querría destacar dos ideas que de alguna manera condensan la experiencia obtenida en el trabajo diario durante cuatro años con este tipo de instrumentos:

- 1) Los sistemas de olfato electrónico tienen un futuro importante en diferentes sectores industriales, siempre y cuando se diseñen y optimicen pensando desde un principio en la aplicación a la que van dirigidos. Pasarán muchos años antes de que un único sistema, imitando las capacidades del olfato biológico, pueda dar respuesta global a todos los problemas y aplicaciones que el universo de los aromas nos ofrece.
- 2) Lejos de ser un tema sin futuro, la técnica asociada a los equipos de olfato electrónico puede seguir avanzando si se cuestionan constantemente los principios de funcionamiento en los que se fundamentan los equipos comerciales actuales y se proponen ideas novedosas que permitan superar las limitaciones actuales. En este sentido, quiero afirmar modestamente que esta tesis doctoral ha intentado aportar su granito de arena en este largo camino que algún día permitirá a estos instrumentos ocupar un lugar privilegiado en un gran número de sectores industriales, algunos conocidos y otros por descubrir.