
Caso práctico: detección de gotas de tinta mediante una fotobarrera

PID_00251487

Francisco Vázquez Gallego
Pere Tuset Peiró

Tiempo mínimo de dedicación recomendado: 1 hora



Universitat
Oberta
de Catalunya

Ninguna parte de esta publicación, incluido el diseño general y la cubierta, puede ser copiada, reproducida, almacenada o transmitida de ninguna forma, ni por ningún medio, sea éste eléctrico, químico, mecánico, óptico, grabación, fotocopia, o cualquier otro, sin la previa autorización escrita de los titulares del copyright.

Índice

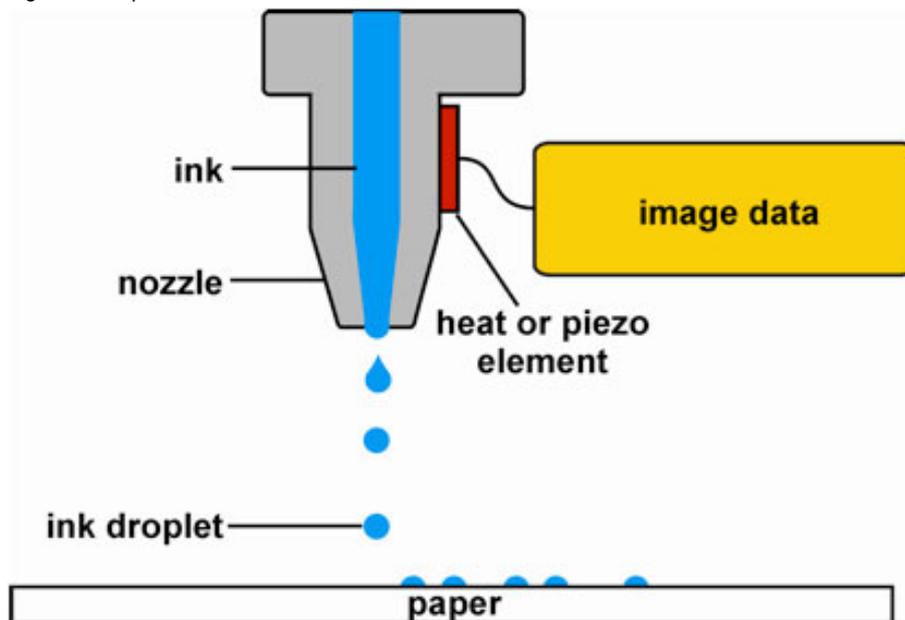
1. Introducción	5
2. Sensores y adquisición de datos	9
3. Procesado digital y análisis de datos	10
4. Mejoras en el procesado digital y en la detección	13
5. Discusión	17
Bibliografía	18

1. Introducción

Las impresoras de inyección de tinta aparecieron a mediados de los años setenta de la mano de empresas como Epson, Hewlett&Packard y Canon. Estas impresoras se desarrollaron como alternativa a las impresoras matriciales, disponibles desde mediados de los años cincuenta, en las cuales el cabezal de impresión se desplazaba a derecha e izquierda y se utilizaba una aguja para oprimir una cinta de tinta contra el papel, de manera similar a las antiguas máquinas de escribir.

A diferencia de las impresoras matriciales, las impresoras de inyección de tinta se caracterizan por utilizar un cabezal de impresión con tecnología DOD (del inglés *drop on demand*), que permiten reproducir imágenes digitales sobre un sustrato utilizando la técnica del *halftoning*. Es decir, para formar cada punto de color discreto de la imagen digital sobre el papel, se combinan gotas de tinta de diferente color (habitualmente amarillo, cian, magenta y negro), tamaño (con un volumen del orden de nanolitros) y espaciado, de modo que se consigue generar los diferentes tonos de color de manera inapreciable a simple vista.

Figura 1. Drop on demand: DOD



En el desarrollo de una impresora basada en la tecnología DOD, se presentan dos retos de diseño fundamentales. En primer lugar, la formulación química de la tinta que se utiliza para transportar el pigmento para cada color. Y en segundo lugar, el diseño del mecanismo de disparo de las gotas de tinta que forman la imagen sobre el sustrato. La

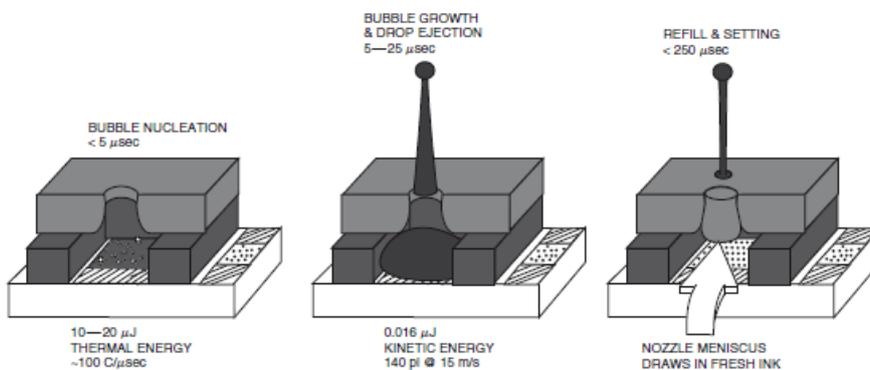
formulación química de la tinta queda fuera del alcance de este caso de uso, que se centra en el mecanismo de disparo de la tinta sobre el sustrato.

En la actualidad, existen dos tecnologías ampliamente utilizadas en el diseño del mecanismo de disparo de las gotas de tinta para impresoras: la tecnología PIJ (*piezoelectric inkjet*), y la tecnología TIJ (*thermal inkjet*).

En el caso de las impresoras basadas en la **tecnología PIJ**, el disparo de la tinta se basa en el efecto piezoeléctrico. El mecanismo de disparo de tinta incluye un material con propiedades piezoeléctricas cuya forma cambia al aplicarle una tensión eléctrica. Dicho cambio de forma en el material provoca un aumento en la presión del fluido en el interior de la cámara de disparo, que fuerza la salida de tinta a través de un orificio.

En cambio, en el caso de las impresoras basadas en la **tecnología TIJ**, el disparo de la tinta se basa en el efecto Joule. En concreto, el mecanismo de disparo contiene una resistencia que se calienta al hacer pasar una corriente eléctrica a través de la resistencia. El calor generado en la resistencia provoca la rápida evaporación de la tinta y la formación de una burbuja. Cuando la burbuja estalla, provoca que una gota de tinta sea propulsada hacia el exterior a través de un orificio, debido a la diferencia de presión.

Figura 2. Thermal InkJet: TIJ



Entre las ventajas de la tecnología PIJ, destacan su alta velocidad de disparo y la larga vida útil de los cabezales de impresión. En cambio, la tecnología TIJ destaca por sus bajos costes de fabricación, al no ser necesaria la utilización de materiales piezoeléctricos, y por este motivo la tecnología TIJ es una de las más utilizadas en la construcción de cabezales de impresión a día de hoy. Sin embargo, a pesar de su bajo coste, la tecnología TIJ presenta algunos inconvenientes importantes respecto a la tecnología PIJ.

Los inconvenientes de la tecnología TIJ se pueden clasificar en dos tipos de defectos: transitorios y permanentes. En el caso de los defectos **transitorios**, se encuentra la deposición de partículas de pigmento dentro de las cámaras de disparo (en inglés, *nozzle*), que pueden llegar a obstruir los *nozzles* y afectar al tamaño y la trayectoria de las gotas de tinta disparadas. En el caso de los defectos **permanentes**, se encuentra

Nota

La tecnología PIJ (*piezoelectric inkjet*) fue desarrollada por Epson a principios de los setenta. Por su parte, la tecnología TIJ (*thermal inkjet*) fue desarrollada en paralelo por Canon y Hewlett&Packard a finales de los años setenta. Podéis encontrar más información sobre la tecnología PIJ y TIJ en el siguiente vídeo: <https://www.youtube.com/watch?v=0GtPiQmaQ4k>.

Nota

Podéis encontrar un vídeo explicativo de la tecnología PIJ y TIJ en los siguientes enlaces: <https://www.youtube.com/watch?v=TSGfitx1kzI> y <https://www.youtube.com/watch?v=5iiJMv-jh7U>.

la muerte de los *nozzles* debido a la rotura de la resistencia interna de la cámara de disparo, provocada por las altas temperaturas necesarias para disparar la tinta.

Los dos defectos, acumulados a lo largo del tiempo, tienen un impacto negativo en calidad de la imagen percibida por el usuario. La solución a largo plazo consiste en sustituir los cabezales de impresión que no funcionan correctamente, pero el coste temporal y económico para el usuario ha llevado a los fabricantes a diseñar e integrar diferentes mecanismos para detectar y mitigar los defectos de la muerte y la obturación de los *nozzles* en los cabezales de impresión.

Uno de los primeros mecanismos para mitigar los defectos de la obturación de los *nozzles* es el proceso denominado *prime*, que consiste en forzar la salida de tinta mediante un incremento forzado de la presión interna del cabezal de impresión. Si bien el proceso de *prime* consigue mitigar los defectos transitorios de deposición de partículas de pigmento, este mecanismo no es adecuado en caso de rotura de la resistencia del *nozzle*, ya que esta queda inservible.

Para combatir los defectos *permanentes* y conseguir alargar la vida útil de los cabezales de impresión, se han desarrollado algoritmos de procesado de imagen que permiten reemplazar los *nozzles* dañados por *nozzles* operativos durante el proceso de impresión. Esta técnica aprovecha la redundancia espacial de los cabezales de impresión, es decir, aprovecha el hecho de que diferentes *nozzles* del cabezal de impresión pasan por el mismo punto en función del avance del papel y el movimiento del carro que transporta el cabezal de impresión.

Si bien la sustitución de *nozzles* utilizando dichos algoritmos de procesado de imagen durante el proceso de impresión es posible *a priori* al tratarse de una imagen digital, su correcta aplicación requiere información actualizada sobre el estado de todos los *nozzles* del cabezal de impresión, para determinar cuáles tienen un funcionamiento correcto y cuáles no, y poder llevar a cabo la sustitución durante el proceso de impresión. Por tanto, es necesario un mecanismo externo que permita determinar con precisión el estado de todos los *nozzles* de cada uno de los cabezales de impresión.

Hasta la fecha, se han propuesto diferentes soluciones para la detección del estado de los *nozzles* de un cabezal de impresión. Una de las soluciones más utilizadas en impresoras de diferentes fabricantes es conocida como mecanismo ODD (del inglés, *optical drop detector*). El mecanismo ODD de una impresora de inyección de tinta consiste en un sistema de medida compuesto por un sensor, una cadena de acondicionamiento de señal, y un convertidor analógico-digital, tal y como se ha descrito en capítulos anteriores. Además, una vez efectuada la conversión analógico-digital, es necesario llevar a cabo un procesado digital y un análisis de los datos para determinar el estado de cada uno de los *nozzles* de un cabezal de impresión.

Los dos procesos son críticos, pues si la información obtenida y procesada por el ODD es correcta, entonces el algoritmo de sustitución de *nozzles* funcionará correctamente, y se conseguirá una imagen sin defectos aparentes, a pesar del estado real del cabezal

Nota

Los cabezales de impresión TIJ se fabrican utilizando tecnología fotolitográfica. Esta técnica es la misma que se emplea para la fabricación de los transistores en un microprocesador.

de impresión. Por el contrario, si la información obtenida no es correcta, entonces el resultado de aplicar el algoritmo de sustitución de *nozzles* no es óptimo, lo que provoca una calidad de imagen que puede ser peor incluso que en el caso de no aplicar este algoritmo.

Además, es importante tener en cuenta que un cabezal de impresión TIJ dispone de varios miles de *nozzles* y, a su vez, cada impresora cuenta con diferentes cabezales de impresión para poder imprimir con los diferentes colores básicos. Por tanto, el proceso de detección del estado de los *nozzles*, además de crítico, es un factor que puede limitar el rendimiento de la impresora durante su funcionamiento.

En los siguientes apartados, se describe de manera detallada el funcionamiento de un ODD. En primer lugar, se describe el sistema de medida, y posteriormente se describe el algoritmo de procesamiento digital y análisis de datos.

2. Sensores y adquisición de datos

El sistema de medida de un ODD incorpora un mecanismo de fotobarrera compuesto por un dispositivo emisor de luz (LED) y un sensor de luz (fotodiodo) que se colocan en la parte inferior de los *nozzles*. De este modo, durante el proceso de detección, las gotas de tinta disparadas por cada *nozzle* cruzan el haz de luz de la fotobarrera y pueden ser detectadas por el fotodiodo gracias al **efecto fotoeléctrico**, que convierte la intensidad de luz procedente del LED en una corriente eléctrica.

En un ámbito óptico, se pueden utilizar LED que operen en el espectro visible (de 390 a 700 nm) o LED que operen en el espectro infrarrojo (de 700 nm a 1.000.000 nm). Así pues, según las propiedades de la luz emitida y las características de las gotas de tinta que atraviesan la fotobarrera, se pueden producir cuatro tipos de interacciones entre la luz y el fluido de la gota de tinta: absorción, reflexión, desviación y refracción. Estas interacciones determinarán la cantidad de luz y la forma de la señal recibidas en el fotodiodo.

A pesar de utilizar un LED rojo de alta potencia, la cantidad de luz recibida en el fotodiodo es muy baja. Por tanto, la corriente eléctrica generada por el fotodiodo también es baja, de modo que es necesario llevar a cabo un proceso de acondicionamiento de la señal antes de hacer la conversión analógico-digital. La etapa de acondicionamiento de la señal analógica procedente del fotodiodo consiste en tres etapas: conversión corriente-tensión, amplificación y filtrado paso bajo.

En primer lugar, se lleva a cabo la conversión del nivel de corriente generada por el fotodiodo en un nivel de tensión y la eliminación del *offset* existente. A continuación, se amplifica la señal de tensión para adecuarla al margen dinámico de la entrada del convertidor analógico-digital. Por último, se lleva a cabo un filtrado paso-bajo *anti-aliasing* para eliminar el ruido e interferencias de alta frecuencia presentes en la señal de entrada antes del proceso de conversión analógico-digital.

A continuación, la señal analógica se muestrea y digitaliza mediante un convertidor analógico-digital. La frecuencia de muestreo de la señal se determina teniendo en cuenta el volumen y la velocidad de las gotas. Además, puesto que el tiempo de vuelo de la gota depende de estos parámetros, así como de la distancia entre el cabezal de impresión y la fotobarrera, el proceso de muestreo y digitalización tiene que ir sincronizado con el proceso de disparo. Teniendo en cuenta todas estas características, se lleva a cabo un muestreo con una frecuencia de aproximadamente 40 kHz y una digitalización con una resolución de 10 bits. Debido al nivel de ruido presente en la señal digital, se descartan los 2 bits menos significativos, de modo que se tiene una resolución útil de 8 bits.

Nota

Para más información sobre el mecanismo ODD, se puede consultar el artículo «Non-contact optical sensor to detect free flying droplets in the nanolitre range» [Tröndle y otros (2010)].

3. Procesado digital y análisis de datos

Una vez muestreada y digitalizada la señal, se lleva a cabo un procesado digital y el posterior análisis de los datos para determinar si el *nozzle* ha disparado la gota de tinta de forma correcta y, en ese caso, declarar el *nozzle* como funcional. Esta información será utilizada *a posteriori* como entrada del algoritmo de sustitución de *nozzles* durante el proceso de impresión.

Existen múltiples técnicas de análisis que se pueden aplicar a la señal adquirida para determinar si un *nozzle* es funcional. Una de las técnicas más sencillas consiste en utilizar la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo de la señal digital (o valor *pico a pico*) y definir un valor umbral (o *threshold*) que permita determinar el estado de cada *nozzle*. Así pues, si el valor *pico a pico* obtenido está por debajo del *threshold*, entonces se considera que el *nozzle* está dañado y, por tanto, no debe ser utilizado. Por el contrario, si el valor *pico a pico* obtenido está por encima del *threshold*, entonces se considera que el *nozzle* es funcional y, por tanto, puede ser utilizado para sustituir otro *nozzle* que esté dañado.

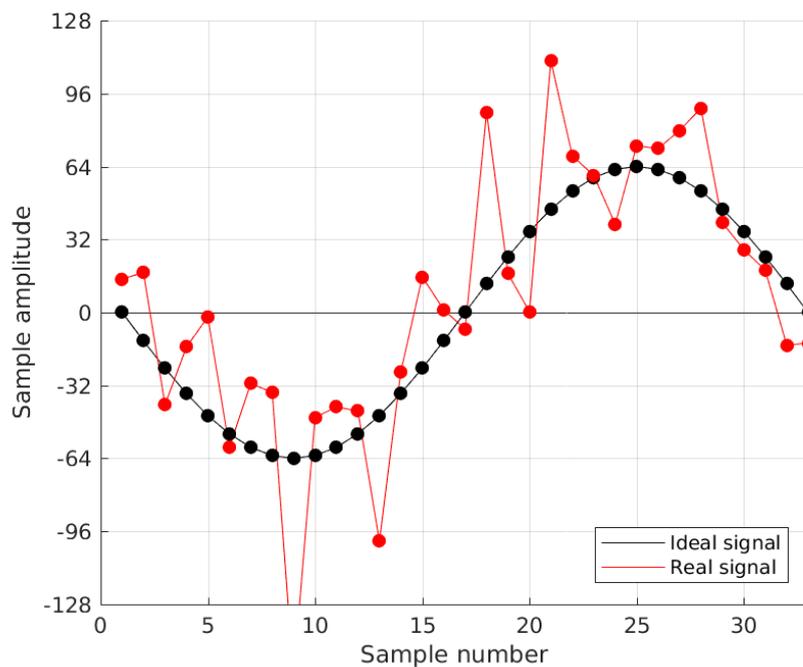
Si bien la técnica de análisis del estado de los *nozzles* de un cabezal de impresión mediante el valor de *pico a pico* es válida desde un punto de vista funcional, dicha técnica presenta los siguientes inconvenientes:

- 1) Es importante observar que existe un compromiso a la hora de escoger el valor del *threshold* para determinar el estado de un *nozzle*. Un valor del *threshold* muy elevado puede asegurar que los *nozzles* que estén por encima de este *threshold* sean realmente funcionales. El problema de esta aproximación es que resulta muy probable que haya *nozzles* que sean funcionales a pesar de tener un valor de *pico a pico* por debajo del *threshold*. Por el contrario, utilizar un valor de *threshold* muy bajo asegura que solo los *nozzles* realmente dañados sean clasificados como tal. El problema, en este caso, es que resulta probable que algunos *nozzles* no funcionales den un valor de *pico a pico* superior al *threshold* y, por tanto, sean clasificados como buenos.
- 2) Hay que tener en cuenta que el tamaño y la forma de las gotas de tinta que dispara un *nozzle* dependen de varios factores, como son el color y la formulación de la tinta y la frecuencia de disparo de las gotas. Del mismo modo, el nivel de la señal analógica generada por el sensor dependerá de las propiedades eléctricas y térmicas de cada par LED-fotodiodo, así como de su alineamiento mecánico. Además, estos parámetros no son fijos, sino que varían en función de otros parámetros externos, como pueden ser la temperatura y la humedad, y presentan desviaciones debido al envejecimiento de los componentes. Por ejemplo, se sabe que las gotas negras tienen un mayor grado de absorción de la luz, de modo que los valores de *pico a pico* de la señal son inferiores

que en el caso de la tinta amarilla. De manera similar, la falta de alineamiento entre el par LED-fotodiodo puede provocar unos valores de *pico a pico* menores respecto a un par LED-fotodiodo correctamente alineado.

3) También debe tenerse en cuenta que el ODD está compuesto por elementos eléctricos susceptibles a interferencias electromagnéticas presentes en su lugar de funcionamiento, ya sean interferencias generadas por otros circuitos eléctricos incluidos en la propia impresora, o bien por otros equipos funcionando en la proximidad de la impresora. Estas interferencias se pueden acoplar al sistema de medida, ya sea de forma conducida o mediante acoplamiento inductivo o capacitivo, y pueden alterar los resultados de la medida. Por ejemplo, si se utilizara un valor de *threshold* muy bajo, se podría dar el caso de que el nivel de la señal interferente sea detectado como un falso positivo, es decir, que dé por funcional un *nozzle* dañado, lo cual provoque errores en el proceso de intercambio de cabezales y la consiguiente degradación en la calidad de imagen.

Figura 3. Calibración: ddSignal



De las tres observaciones anteriores, se derivan las siguientes conclusiones. En primer lugar, que el valor del *threshold* es crítico a la hora de determinar correctamente el estado de los *nozzles* de un cabezal de impresión. En segundo lugar, que dicho valor de *threshold* no puede ser un valor constante para todas las tintas, ni para todos los pares LED-fotodiodo. Por último, que el valor del *threshold* debe actualizarse periódicamente según cuáles sean las condiciones de funcionamiento del sistema y el envejecimiento del mismo.

Así pues, para encontrar el valor óptimo de *threshold* para cada par LED-fotodiodo y cabezal de impresión, es necesario llevar a cabo un proceso de calibración. Además,

este proceso de calibración debe poder hacerse de manera periódica y, si es posible, con una intervención mínima por parte del usuario final.

4. Mejoras en el procesamiento digital y en la detección

Como se ha visto en el apartado anterior, la detección del estado de los *nozzles* de un cabezal de impresión mediante un valor de *threshold* es susceptible a las perturbaciones propias del sistema (mecánicas y eléctricas), así como a las variaciones de las condiciones ambientales del lugar donde funciona la impresora (temperatura y humedad).

Una posible alternativa para mejorar la detección del estado de los *nozzles* consiste en utilizar un mecanismo basado en *threshold* adaptativo que permita mejorar la robustez del sistema frente a las perturbaciones del sistema y del entorno. Este mecanismo se basa en calcular para cada realización el valor medio de señal visto por el fotodiodo. Sin embargo, esta alternativa sigue siendo poco robusta frente al ruido y las interferencias electromagnéticas, que pueden generar falsos positivos en la detección del estado de los *nozzles*, y afectar al algoritmo de sustitución e impactar negativamente en la calidad de la imagen percibida por el usuario.

Otra alternativa para mejorar el funcionamiento del sistema en presencia de ruido e interferencias consiste en utilizar un filtro adaptado (del inglés, *matched filter*), una técnica de filtrado utilizada en la detección de aviones y barcos mediante radar. El filtro adaptado se puede implementar de manera digital y permite detectar la presencia de una señal conocida, o de referencia, dentro de una señal recibida con ruido. La señal de salida del filtro adaptado consiste en la convolución de la señal de referencia con la señal recibida, y se considera el filtro óptimo para detectar señales conocidas *a priori* en presencia de ruido blanco gaussiano.

El primer paso para implementar un filtro adaptado consiste en obtener la señal conocida que se utilizará *a posteriori* para llevar a cabo un filtraje óptimo. Esta señal es desconocida *a priori* y, además, es particular para cada par LED-fotodiodo. Por tanto, es necesario llevar a cabo un proceso de calibración del sistema para obtener la señal de referencia que hay que utilizar en el proceso de filtrado. Para ello, cada realización del proceso de adquisición del ODD se puede considerar independiente desde un punto de vista estadístico, debido a las propiedades de superposición de ruido del sistema a la señal deseada. Así pues, para filtrar el ruido presente en cada adquisición y obtener la señal de referencia, se utiliza un mecanismo de promediado en espacio (del inglés, *ensemble average*), que consiste en adquirir múltiples señales de salida del sistema y llevar a cabo un promediado de todos los valores obtenidos para cada punto, tal y como se muestra en la figura 5.

Nota

El AWGN (del inglés, *additive white gaussian noise*) es una señal aleatoria que se caracteriza por tener una densidad espectral de potencia constante, es decir, en la que todas las frecuencias tienen la misma potencia media.

Figura 4. Mecanismo de obtención de la señal de referencia del filtro adaptado basado en el promediado de múltiples señales de salida del sistema de medida

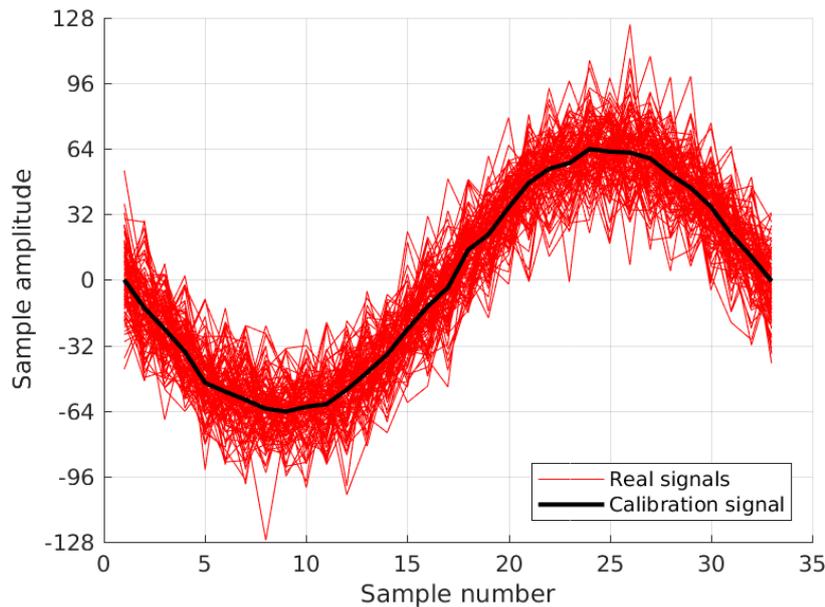
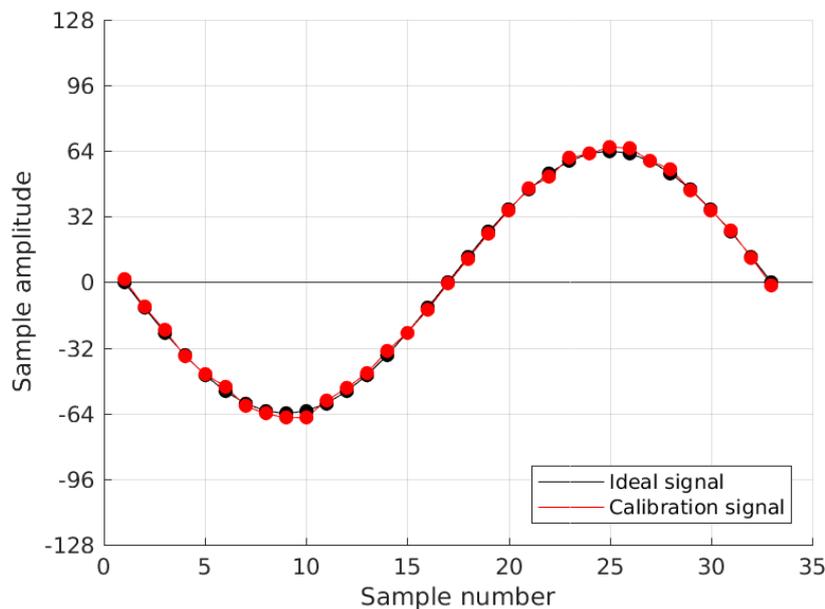


Figura 5. Mecanismo de obtención de la señal de referencia del filtro adaptado basado en el promediado de múltiples señales de salida del sistema de medida



Una vez obtenida la señal de referencia, esta se almacena para su uso posterior en el proceso de detección. En concreto, durante la detección se lleva a cabo otra realización independiente del proceso, es decir, se adquiere la señal con el ruido superpuesto. Así pues, para obtener la señal filtrada se lleva a cabo la convolución entre la señal adquirida y la señal de referencia, y se normaliza el resultado obtenido utilizando el producto escalar de la señal de referencia. Con este proceso, la salida del filtro nos muestra el nivel de similitud entre la señal adquirida y la señal de referencia, a pesar de la presencia de ruido. Unos valores próximos a la unidad indican una clara

relación entre la señal adquirida y la señal de referencia. Por el contrario, unos valores próximos a cero indican que no existe esta relación entre la señal adquirida y la señal de referencia.

Figura 6. Calibración: ddInput1

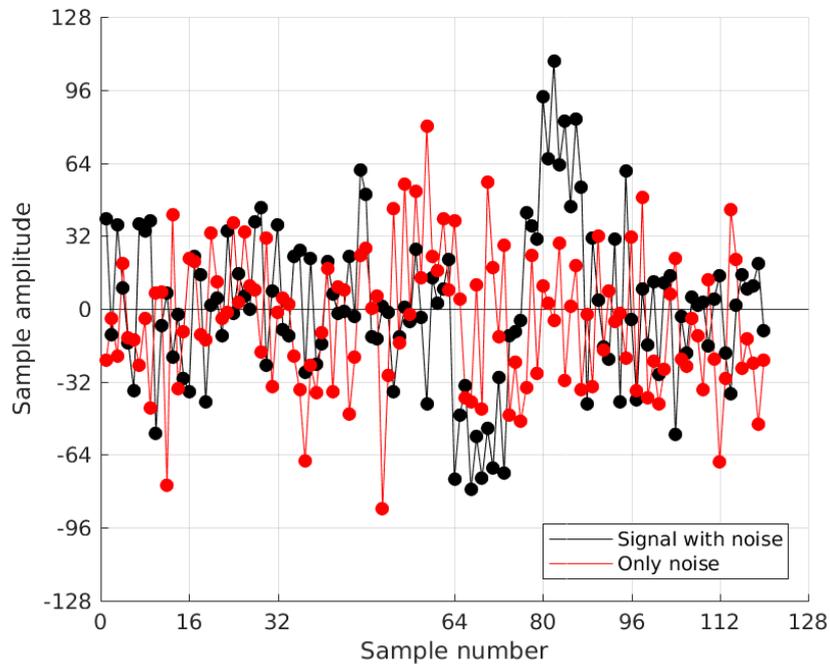
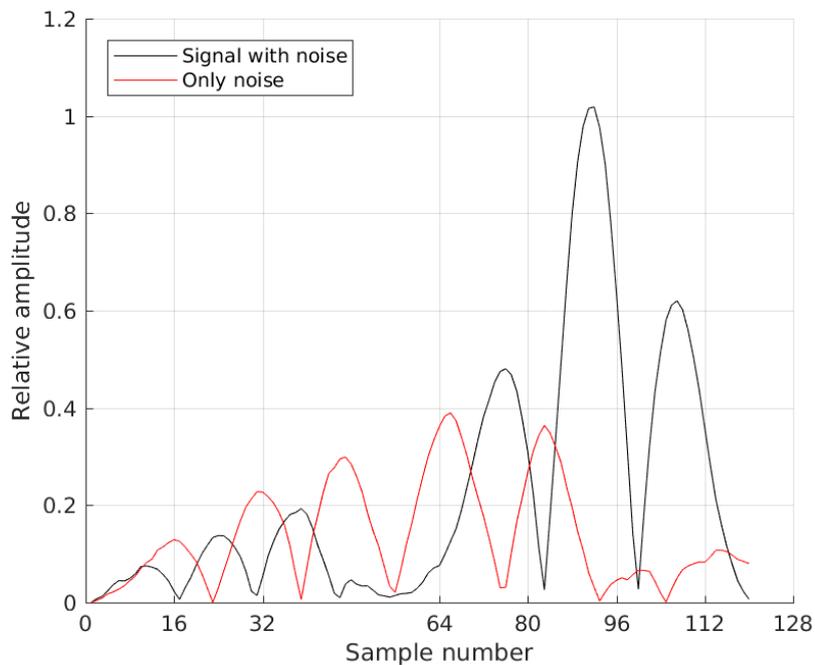


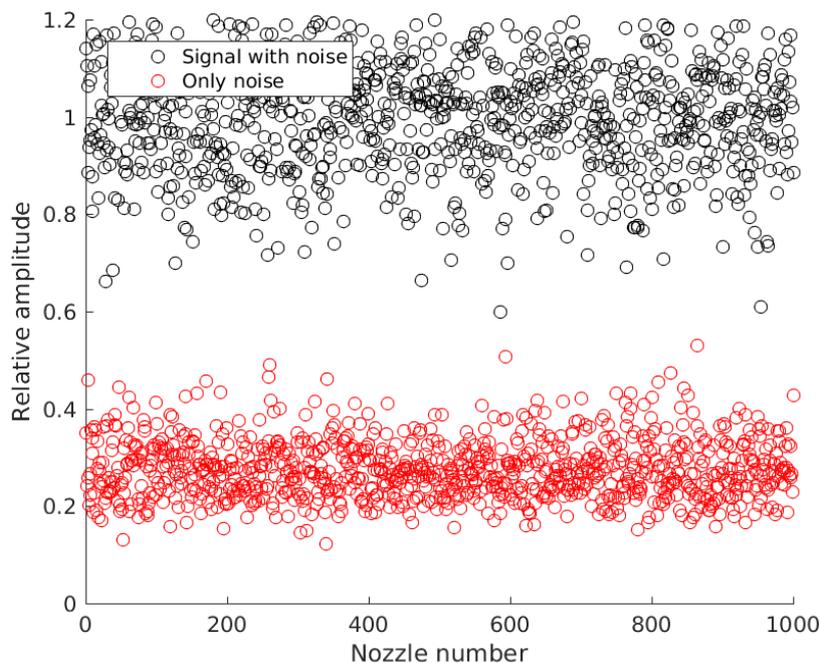
Figura 7. Calibración: ddOutput1



A pesar de que el filtro adaptado garantiza que la SNR (del inglés, *signal-to-noise ratio*) a su salida es máxima y nos ofrece un indicador de la similitud que existe entre

las dos señales, el mecanismo de detección basado en un *threshold*, ya sea fijo o adaptativo, sigue siendo susceptible a falsos positivos y falsos negativos durante el proceso de detección, especialmente en el caso en el que el ruido acoplado sea de una magnitud parecida a la señal. Por este motivo, se hace necesario buscar una alternativa más robusta que permita minimizar los errores en el proceso de detección y, así, mejorar el rendimiento de los algoritmos de sustitución de *nozzles*.

Figura 8. Calibración: ddClassification2



Como veremos más adelante en la PLA de análisis de datos, existen diferentes alternativas para la clasificación y detección automática de datos. Estas soluciones se engloban dentro del ámbito del *aprendizaje automático* y se pueden clasificar entre aprendizaje supervisado, aprendizaje no supervisado y aprendizaje por refuerzo. Cada uno de estos mecanismos tiene sus ventajas e inconvenientes, y se puede aplicar en función de la tipología de los datos que hay que analizar y clasificar.

En el caso que nos ocupa, y teniendo en cuenta que es posible disponer de datos de entrenamiento a través del proceso de calibración, se ha utilizado un mecanismo de aprendizaje supervisado y basado en máquinas de vectores de soporte (SVM; *support vector machine*), que permite la clasificación automática de datos en categorías. En concreto, las SVM se basan en encontrar el punto en el que la separación entre las dos categorías es máxima a través de una ecuación lineal, de modo que se minimiza la probabilidad de falsos positivos y falsos negativos. Así pues, los datos que hay que utilizar para la clasificación serían aquellos proporcionados a la salida del filtro adaptado.

Nota

Aprendizaje automático (del inglés, *machine learning*) es un campo de la inteligencia artificial que tiene como objetivo desarrollar técnicas que permitan a los sistemas digitales aprender.

5. Discusión

Como se ha visto a lo largo del caso de uso, una selección adecuada del sensor en función del parámetro físico que hay que medir, así como el correcto diseño de la cadena analógica de la señal, son aspectos críticos de cualquier sistema de medida. Además, el proceso de calibración del sistema, tanto mecánico como eléctrico, resulta vital para eliminar los efectos no deseados y poder relacionar de manera directa la información digital con el parámetro físico objeto de medición.

Por otro lado, la tendencia actual es a muestrear y digitalizar la señal analógica cerca del propio sensor, para permitir su transporte y procesado de manera digital. Esto ofrece una mayor robustez frente al ruido eléctrico, así como una mayor flexibilidad en el posprocesado. Como hemos visto, la aplicación de filtros digitales y la utilización de mecanismos de aprendizaje automático permiten sacar el máximo partido a los sistemas de medida y ofrecen opciones de reconfiguración una vez que el producto está desplegado en el campo.

A pesar de ello, hay que ser consciente de que cualquier efecto no deseado presente en el proceso de muestreo y digitalización ya no podrá ser corregido *a posteriori* y, por tanto, un buen diseño analógico resulta imprescindible para asegurar el correcto funcionamiento del sistema.

Bibliografía

Tröndle, J.; Ernst, A.; Streule, W.; Zengerle, R.; Koltay, P. (2010). «Noncontact optical sensor to detect free flying droplets in the nanolitre range». *Sensors and Actuators A: Physical*, volumen 158 (n.o 2, págs. 254 – 262). ISSN 0924-4247. doi: <http://doi.org/10.1016/j.sna.2010.01.023>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424710000245>.