



## DESARROLLO DE SENSORES INTELIGENTES BASADOS EN FENÓMENOS VIBRO-ACÚSTICOS

Cesar Asensio Rivera<sup>2</sup>, Ignacio Pavón García<sup>1</sup>, Juan Manuel López Navarro<sup>2</sup>, Guillermo de Arcas Castro<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Investigación en Instrumentación y Acústica Aplicada, ETSI Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España

<sup>2</sup>Grupo de Investigación en Instrumentación y Acústica Aplicada, ETSI Sistemas de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España

### RESUMEN

El desarrollo de sensores inteligentes basados en el análisis de señales vibro-acústicas ha sufrido una fuerte evolución en las últimas décadas, encontrando aplicación en sectores tan diferentes como la energía, el transporte, la monitorización de procesos industriales, el medioambiente o la salud, entre otros. En muchas ocasiones este tipo de soluciones se basan en el empleo de diferentes técnicas de inteligencia artificial que permiten alcanzar resultados muy atractivos, al menos a priori, pero que también plantean algunas preguntas sobre las que conviene reflexionar ¿Hasta qué punto los resultados obtenidos son generalizables? ¿Qué consideraciones se deben tener en cuenta desde el punto de vista de la implementación en dispositivos de propósito específico? ¿Debemos conformarnos con alcanzar buenos resultados en las métricas de evaluación, o estas soluciones deberían ayudarnos también a mejorar nuestro conocimiento sobre los procesos que están modelando? Estas son algunas de las preguntas que se pretende abordar en este trabajo a través de la revisión de algunos trabajos en los que han participado los autores en los últimos años.

### ABSTRACT

The development of intelligent sensors based on the analysis of vibro-acoustic signals has increased significantly in recent years, finding application in sectors as different as energy, transportation, monitoring of industrial processes, the environment or health, among others. In many cases, these solutions are based on the use of different artificial intelligence techniques that allow us to achieve very attractive results, at least a priori, but they also raise some concerns. To what extent are the results obtained generalizable? What considerations should be taken into account from the point of view of their implementation in specific devices and when? Is it enough to achieve good results in the evaluation metrics, or should these solutions

also help us to improve our knowledge about the processes that they are modeling? These are some of the questions that this work aims to address through the review of some works in which the authors have participated in recent years.

**Palabras Clave**— sensores inteligentes, inteligencia artificial, tratamiento digital de la señal, instrumentación.

### 1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se han producido una serie de cambios tecnológicos que han propiciado un aumento importante en el desarrollo de lo que podríamos denominar sensores inteligentes. Entendemos como tales, aquellos sensores que incluyen no sólo la función de transducción para la que han sido diseñados, sino también el procesamiento de las señales de salida para obtener mejores prestaciones o incluso para desarrollar nuevas funcionalidades. Dentro de este tipo de soluciones, toman especial relevancia para este congreso aquellas basadas en fenómenos vibro-acústicos, y que por tanto persiguen el desarrollo de nuevas aplicaciones basadas en el análisis de señales procedentes de micrófonos, acelerómetros, o cualquier otro tipo de transductor sensible a dichos fenómenos.

El desarrollo de este tipo de aplicaciones ha sido una de las líneas de investigación en las que han venido trabajando los autores de este trabajo en el Grupo de Investigación en Instrumentación y Acústica Aplicada de la Universidad Politécnica de Madrid. En este artículo se presentan tres ejemplos de investigaciones desarrolladas en tres sectores diferentes (transporte, industria y salud) que sirven de base para plantear algunas reflexiones sobre el desarrollo de este tipo de soluciones.

### 2. DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE ASFALTO SECO/MOJADO EN VEHÍCULOS

La incorporación de dispositivos electrónicos en el automóvil ha contribuido de forma importante a mejorar la seguridad y

\* *Autor de contacto:* primer.autor@miemail.com

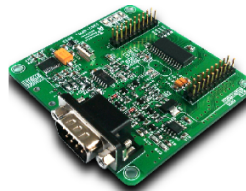
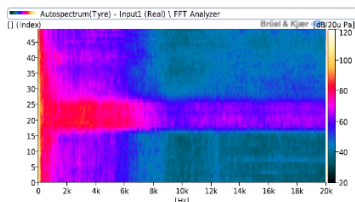
**Copyright:** ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

el confort, con relevantes contribuciones tanto en sistemas de seguridad activa como de asistencia a la conducción. En esta investigación (1) se desarrolló un sistema de discriminación del estado de la carretera (seco/mojado) basada en el análisis del ruido de rodadura generado durante la conducción.

El sistema se desarrolló en tres fases: en primer lugar se realizó una prueba de concepto utilizando una integración basada en instrumentación modular embarcada en un vehículo automóvil para demostrar la viabilidad de la solución. A continuación, se diseñó un prototipo funcional basado en un procesador digital de la señal con capacidad para analizar y detectar los cambios en el asfalto en tiempo real, y finalmente tras realizar varias optimizaciones se desarrolló un prototipo industrializable basado en un microcontrolador que permite la integración con las ECU del vehículo para obtener datos capturados por los sensores del mismo y enviar las estimaciones del estado del firme.

El sistema de detección se basa en un clasificador basado en máquinas de vectores soporte (SVM), desarrollado y evaluado utilizando Matlab y que proporciona tasas de aciertos aceptables (de más del 90%). El sistema se basa en el principio de que la huella acústica de ruido de rodadura generada por la interacción rueda asfalto difiere dependiendo del estado del firme. Por tanto, en primer lugar se utiliza un micrófono para capturar el ruido de rodadura, y como se pretende que el sistema se pueda realizar con elementos de bajo coste se impone el uso de un micrófono de tipo electret, en concreto el modelo WM-63PR de Panasonic, que cumple con los requisitos de sensibilidad, relación señal a ruido y respuesta en frecuencia.

En segundo lugar se digitaliza la señal y se extrae el conjunto de características con el que se entrena el clasificador. Estas se obtuvieron a partir de los 30 valores de la potencia en bandas de tercio de octava normalizadas aplicando técnicas de reducción de características. Tras evaluar las prestaciones para diferentes configuraciones en la fase de optimización del prototipo final se eligió una configuración con 4 características, que es capaz de proporcionar prestaciones razonables minimizando los requisitos del sistema de procesamiento de la señal, y por tanto permitiendo utilizar un sistema más sencillo, y además reducir su consumo (2) (3).



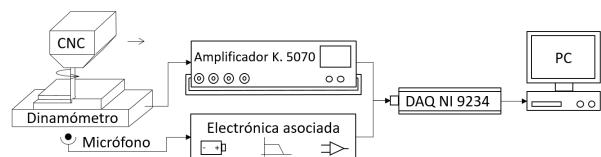
**Figura 1.** Sistema de detección del estado del asfalto: principio de funcionamiento y aspecto del prototipo industrializado y patentado.

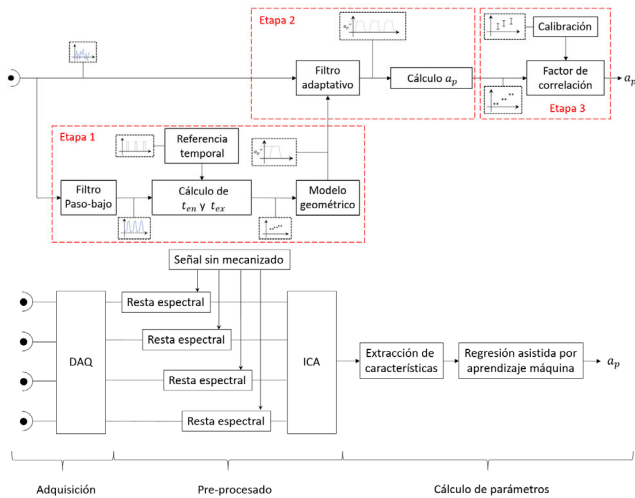
### 3. MONITORIZACIÓN NO INVASIVO EN PROCESOS DE MECANIZADO

Se estima que las operaciones de mecanizado representan alrededor del 5% del PIB de los países desarrollados (4). Si bien el nivel de automatización en este tipo de sistemas es muy elevado, existen aún numerosos retos en la monitorización y modelización de dichos procesos. Un ejemplo, es el sistema de monitorización no invasiva desarrollado en esta investigación (5) para monitorizar operaciones de fresado periférico, utilizadas habitualmente tanto en operaciones de mecanizado como de acabado. En dicho trabajo se compara un desarrollo basado en técnicas tradicionales de modelado del proceso y el análisis mediante técnicas de tratamiento digital de la señal (6), con otro basado en técnicas de modelado basado en datos (7).

En el primer caso el sistema se basa en un modelo geométrico del proceso de mecanizado (8) desarrollado en el Laboratorio de Fabricación de la ETSI Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid que permite calcular la profundidad de corte en un proceso de fresado a partir del ángulo de proyección, el periodo de rotación de la herramienta y su diámetro. El ángulo de proyección de la herramienta se calcula a partir de los tiempos de entrada y salida de la misma, obtenidos a partir del análisis de la señal de ruido aéreo captada por un micrófono.

La parte superior de la figura 2 muestra un esquema del montaje utilizado durante los experimentos, y en la parte intermedia se muestra el diagrama del algoritmo desarrollado. El sensor incluye una pequeña etapa de acondicionamiento encargada de maximizar el margen dinámico y reducir el ruido. Posteriormente, una tarjeta de adquisición de alta resolución digitaliza la señal para su posterior filtrado siguiendo el esquema descrito en la figura. El algoritmo consiste en un filtro adaptativo (etapa 2) que toma como referencia una señal sintética generada a partir del modelo del proceso alimentado por los parámetros que se conocen del mismo (1). El filtro permite mejorar la relación señal ruido lo suficiente como para poder extraer los tiempos de entrada y salida de la herramienta, y finalmente calcular la profundidad de corte utilizando el modelo descrito anteriormente. Los resultados obtenidos se compararon con los de un sistema basado en un dinamómetro repitiendo los ensayos varias veces para valores de la profundidad de corte entre 2 y 10 mm, obteniendo una desviación máxima respecto al valor del dinamómetro del 0,5% para  $a_p=2\text{mm}$ , y una varianza entorno al doble ( $64\mu\text{m}@a_p=8$  respecto a  $31\mu\text{m}$  del dinamómetro).





**Figura 2.** Sistema de monitorización no invasivo para operaciones de fresado periférico en procesos de mecanizado.

El segundo desarrollo tenía como objetivo disminuir la varianza de las estimaciones y para ello se combinó un sistema multicanal de 4 micrófonos con técnicas de modelado basado en datos asistidas por algoritmos de inteligencia artificial según se muestra en la parte inferior de la figura 2. El algoritmo comienza aplicando una resta espectral a partir de una señal de referencia registrada cuando la herramienta está girando en vacío junto con un análisis de componentes independientes (ICA) para intentar extraer la señal de mecanizado. A partir de ahí se extrae un conjunto de características para entrenar un modelo de regresión asistido por aprendizaje máquina. En concreto se extraen 19 características de cada ventana temporal: 6 primeros armónicos de la transformada de Fourier, potencia en 4 bandas de tercios de octava, pendiente, flujo y punto de caída espectral, centroide, pitch, valor eficaz, planitud y dispersión espectral y entropía. Los resultados obtenidos muestran una buena precisión en términos del error absoluto, mostrando un error medio de un 1% para valores de la profundidad de corte por encima de 1mm. Los resultados aportados por el dinamómetro asistido por aprendizaje máquina presentan una dispersión sensiblemente menor que por el método analítico, pero el modelo de regresión empleado está limitado a trabajar dentro de los parámetros con los que ha sido entrenado, siendo necesario re-entrenar con nuevos valores para poder trabajar fuera de esos límites. En ambos casos esta prueba de concepto demuestra que es posible monitorizar este tipo de procesos a partir de la señal de ruido generada por la interacción entre la herramienta y la pieza a mecanizar, si bien es cierto que aún se deben dar muchos pasos para su posible industrialización.

#### 4. SEGUIMIENTO DE SÍNTOMAS MOTORES EN LA ENFERMEDAD DE PARKINSON

La salud es otro de los campos de aplicación importante de este tipo de soluciones, como por ejemplo demuestran la gran cantidad de estudios publicados orientados a desarrollar sistemas de asistencia al diagnóstico de diferentes patologías basados en el análisis de voz, o las numerosas aplicaciones que se están desarrollando basándose en el análisis de las señales obtenidas a partir de métodos de imagen por ultrasonidos. Sin embargo, en esta tercera investigación (9) nos centramos en analizar la posibilidad de utilizar los sensores inerciales de relojes o pulseras inteligentes comerciales para analizar los síntomas motores de enfermos de Parkinson. Esta es la segunda enfermedad de tipo neurodegenerativo por prevalencia, y su gestión clínica presenta numerosos retos actualmente, tanto desde el punto de vista de los tratamientos, como de su diagnóstico y seguimiento.

El sistema, cuyo esquema se resume en la figura 3, se basa en analizar las señales de los acelerómetros de un reloj inteligente cuando el paciente realiza una serie de ejercicios guiados. Estos ejercicios están extraídos de las escalas de valoración clínica que utilizan los neurólogos y han sido diseñados para evaluar diferentes síntomas, como el nivel de temblor, la lentitud de movimiento, o la presencia de movimientos involuntarios. En su desarrollo se combinaron tanto datos experimentales obtenidos por los autores durante la investigación, así como los que habían publicado otros autores. Para ello en primer lugar se desarrolló un sistema de recolección de datos denominado Monipar y se caracterizaron los dispositivos a utilizar (10). Posteriormente se desarrollaron diferentes algoritmos para la detección o clasificación de cada síntoma mediante combinando técnicas de procesamiento digital para la extracción de características y algoritmos de aprendizaje automático y profundo para las tareas de clasificación (11) (12) (13).



**Figura 3.** Sistema para el seguimiento de síntomas motores en la enfermedad de Parkinson

Esta metodología también se ha aplicado en otros campos como la detección automática del tipo de herramientas para estudios de seguridad laboral (14) y actualmente se está aplicando para el reconocimiento de la actividad humana.

## 5. CONCLUSIONES

En los trabajos anteriores se han descrito diferentes desarrollos que combinan tanto técnicas tradicionales de modelado de sistemas y de tratamiento digital de la señal, como soluciones basadas en técnicas de aprendizaje automático y profundo. Los ejemplos también muestran investigaciones en diferentes fases de madurez tecnológica, incluyendo desde pruebas de concepto a dispositivos industrializados preparados para integrarse en sistemas comerciales en funcionamiento.

En concreto, en el primer ejemplo se muestra el desarrollo de una solución que cubre todas las etapas desde la prueba de concepto al desarrollo del prototipo industrializable. Lógicamente las tecnologías utilizadas en cada una de estas etapas son diferentes, puesto que el esfuerzo en cada una de ellas debe concentrarse en los objetivos a cubrir en cada fase. En ese sentido, los sistemas de instrumentación abiertos, que permiten integrar diferentes módulos hardware en sistemas compactos a la vez que proporcionan fuertes capacidades de análisis de datos y comunicaciones son ideales para las primeras fases de prototipado debido a su flexibilidad y a la rapidez que ofrecen para poner en marcha un sistema de experimentación. En estas fases la adquisición de datos es el punto crítico, ya que en general el análisis se realizará fuera de línea (offline) e incluso los sensores podrán evolucionar en función de los resultados que obtengan durante la experimentación, como por ejemplo sucedió en el segundo ejemplo mostrado.

Otra cuestión importante en estos ejemplos es la diferencia de metodologías. En el primer caso desde el principio se tenía claro que modelar un sistema de detección de este tipo utilizando sensores de bajo coste y teniendo en cuenta la variabilidad de las condiciones reales en las que debería funcionar mediante técnicas de modelado tradicional sería complejo. Además, el objetivo era poder llegar a obtener un sensor de bajo coste lo que obligaba a priorizar desde el inicio aquellas alternativas que presentasen menor coste computacional, como por ejemplo las máquinas de vectores soporte. Sin embargo, en el segundo caso la situación es completamente opuesta. El proceso que se quiere modelar es bien conocido y se caracterizado a través de múltiples investigaciones previas, por lo que es más una cuestión de innovación que de investigación. Se trata de ver si se puede capturar la energía que genera un proceso de mecanizado con un micrófono en vez de un dinamómetro y obtener estimaciones de un grado de precisión similar. Por este motivo en primer lugar se desarrolla una solución basada en técnicas de tratamiento digital de señal y el modelo analítico

del proceso, de forma que se facilita la comparación directa entre la solución acústica y la existente. Este desarrollo además invita a profundizar en el conocimiento del proceso, lo cual tiene un valor importante que no debe perderse de vista, y así se pone de manifiesto en el segundo desarrollo cuando se utilizan técnicas de regresión asistidas por aprendizaje máquina. De entre todas las opciones posibles se priorizó el uso de técnicas que incluyesen la definición y extracción de características y para intentar mejorar la explicabilidad del modelo. Si bien los resultados obtenidos en cuanto a la precisión del sistema son ligeramente superiores, el sistema basado en inteligencia artificial adolece de un cierto efecto de caja negra que nos aleja en cierta manera del proceso bajo estudio. Desde luego hay mucho margen para mejorar la solución desarrollada, que en este caso aún está en la fase de prueba de concepto, pero es un ejemplo que quizás permite ver fácilmente la importancia de utilizar técnicas que aporten no sólo prestaciones sino también conocimiento.

El tercer ejemplo también presenta una investigación en fase de prueba de concepto, donde se desea evaluar la posibilidad de utilizar dispositivos comerciales para desarrollar nuevas aplicaciones. El primer aprendizaje importantes de este caso ha sido la importancia de caracterizar adecuadamente la instrumentación antes de utilizarla. En un trabajo un reciente se encontraron diferencias en la desviación respecto a un vibrómetro patrón de hasta el 20% para determinados dispositivos. Además, la cantidad de capas software que incluyen algunas de estas plataformas, cuyo objetivo es facilitar el desarrollo de aplicaciones, en ocasiones se vuelven en contra y dificultan entender exactamente qué tareas realiza el dispositivo en cada momento. Así en algunos relojes inteligentes se han obtenido errores de medida anormalmente elevados debidos a cómo gestiona el sistema operativo los procesos de adquisición del acelerómetro, y no debido a la precisión del mismo.

En este ejemplo, se han combinado tanto técnicas tradicionales como de aprendizaje máquina y profundo, y todas han puesto de relevancia la importancia que tiene el coste de generación de los datos, que en esta aplicación implica trabajar con colectivos vulnerables. En ese sentido, iniciativas como la política de ciencia abierta promovida por la Comisión Europea y los repositorios para el trabajo colaborativo deben jugar un papel vital para minimizar la carga sobre los pacientes. Sin embargo, para que los datos que se comparten sean aún más útiles es imprescindible estandarizar las metodologías y poner en marcha mecanismos que faciliten su completa descripción.

## 6. REFERENCIAS

1. Alonso Fernández, J. *Discriminación del estado de la carretera mediante procesado acústico en vehículo. Tesis (Doctoral), E.T.S.I. Industriales (UPM).* <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.33529>. . 2014.

2. *On-board wet road surface identification using tyre/road noise and Support Vector Machines.* al, Alonso J. et. s.l. : Applied Acoustics, (2014), Vols. 76, pp. 407 - 415. DOI: 10.1016/j.apacoust.2013.09.011.
3. Alonso, J. et al. *Sistema embarcado en vehículos y método para la detección del estado del asfalto.* P201231042 España, 02 25, 2013.
4. *Towards sustainability assessment of machining processes.* H.A. Hegab, B. Darras, H.A. Kishawy. 2018, Journal of Cleaner Production, Vol. 170, pp. 694-703.
5. Sio Sever, A. *Supervisión de las condiciones de mecanizado en operaciones de fresado periférico mediante el análisis de señales de ruido aéreo.* Madrid : Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 2022.
6. *Non-Invasive Estimation of Machining Parameters during End-Milling Operations Based on Acoustic Emission.* Sio-Sever, et al. 2020, Sensors, pp. 20, 5326.
7. *Improved Estimation of End-Milling Parameters from Acoustic Emission Signals Using a Microphone Array Assisted by AI Modelling.* al, Sio-Sever et. s.l. : Sensors , 2022, Vols. 22(10), 3807; <https://doi.org/10.3390/s22103807> .
8. *Accuracy of a new online method for measuring machining parameters in milling.* Leal-Muñoz et al. 2018, Measurement, pp. 128, 170–179.
9. Sigcha Guachamin, L. *Detección automática de síntomas motores asociados a la enfermedad de Parkinson mediante relojes y teléfonos móviles inteligentes aplicando técnicas de inteligencia artificial.* . s.l. : Tesis (Doctoral), E.T.S.I. Industriales. Universidad Politécnica de Madrid, 2021. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.68904> .
10. al, Sigcha L. et. *Occupational risk prevention through smartwatches: Precision and uncertainty effects of the built-in accelerometer.* s.l. : Sensors, 18 (11), art. no. 3805, 2018. DOI: 10.3390/s18113805.
11. *Improvement of Performance in Freezing of Gait detection in Parkinson's Disease using Transformer networks and a single waist-worn triaxial accelerometer.* al, Sigcha L. et. s.l. : Engineering Applications of Artificial Intelligence, 116, art. no. 105482, 2022. DOI: 10.1016/j.engappai.2022.105482.
12. *Automatic resting tremor assessment in parkinson's disease using smartwatches and multitask convolutional neural networks.* al, Sigcha L. et. s.l. : Sensors, 21 (1), art. no. 291, pp. 1 - 29, 2021. DOI: 10.3390/s21010291.
13. *Deep learning approaches for detecting freezing of gait in parkinson's disease patients through on-body acceleration sensors.* al, Sigcha L. et. s.l. : Sensors, 20 (7), art. no. 1895, 2020. DOI: 10.3390/s20071895.
14. *Automatic Identification of Hand-Held Vibrating Tools Through Commercial Smartwatches and Machine Learning.* al, Sigcha L. et. s.l. : Studies in Systems, Decision and Control, 277, pp. 481 - 489, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-41486-3\_52.
15. *Bradykinesia Detection in Parkinson's Disease Using Smartwatches' Inertial Sensors and Deep Learning Methods.* al, Sigcha et. s.l. : Electronics, 11 (23), art. no. 3879, 2022. DOI: 10.3390/electronics11233879.