

Caracterización del diseño de bajo costo de un acelerómetro SMEM para un uso específico

José E. Stuardi¹, Guillermo D. Chiappero¹ y Alejandro J. Giudici¹

¹*Departamento de Estructuras, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina*

Fecha de recepción del manuscrito: 21/09/2022

Fecha de aceptación del manuscrito: 04/05/2022

Fecha de publicación: 06/05/2022

Resumen—Desde hace más de dos décadas los sensores capacitivos basados en tecnología de Sistemas Micro-Electromecánicos (SMEM) han revolucionado la industria y los equipamientos basados en su bajo costo y tamaño reducido. Los acelerómetros se han incluido en todo tipo de dispositivos mejorando la automatización y el control de procesos. Sus especificaciones técnicas los hacen útiles para aplicaciones de frecuencias de hasta algunos cientos de Hz, como IMUs, robótica, monitoreo, dinámica automotriz, celulares y otros dispositivos asociados al uso humano. En este caso, las prestaciones de los sensores y la confiabilidad son debidamente aseguradas en el marco de una instalación fija con parámetros establecidos de antemano. Por otro lado, algunos fabricantes reconocidos proveen acelerómetros de uso general basados en esta tecnología a precios competitivos y cubriendo un rango de aplicación específico. Frente al entusiasmo que despierta el disponer de tecnología moderna y de precio reducido existe la tendencia al uso de chips SMEM de salida analógica y especialmente digital, debido a sus ventajas comparativas. En el presente trabajo se analiza la posibilidad de definir acelerómetros para uso general, incluyendo monitoreo y testeo de vibraciones utilizando chips comerciales de SMEM. Se analizan los requerimientos constructivos que permiten explotar a pleno las características eléctricas del sensor, mediante un adecuado entorno de funcionamiento mecánico y eléctrico. Partiendo de un chip de acelerómetro como ejemplo, se construye un sensor, que luego de testeo y calibrado en baja frecuencia, se muestra confiable para un uso general dentro de las especificaciones técnicas reales medidas.

Palabras clave— acelerómetros, SMEM, vibraciones, testeo, monitoreo.

Abstract—Since more than two decades capacitive sensors based on Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) have revolutionized industry and equipment based on their low cost and small size. Accelerometers have been included in all kinds of devices improving automation and process control. Their technical specifications make them useful for applications with frequencies up to a few hundred Hz, such as IMUs, robotics, monitoring, automotive dynamics, cell phones, human interface, sports and medical devices. In this case, sensor performance and reliability are properly ensured in the framework of a fixed installation with preset parameters. On the other hand, some well-known manufacturers provide general-purpose accelerometers based on this technology at competitive prices and covering a specific application range. Given the enthusiasm for modern and low-cost technology, the use of analog and mainly digital MEMS increases continuously, due to their comparative advantages. In the present work, the possibility of designing general-purpose accelerometers, including vibration monitoring and testing, using commercial MEMS chips is analyzed. The constructive requirements that allow to fully exploit the electrical characteristics of the sensor, by means of a suitable mechanical and electrical operating environment, are studied. Starting from an accelerometer chip as an example, a sensor is built, which is then tested and calibrated at low frequency. The sensor proves to be reliable for general use, within the actual measured technical specifications.

Keywords—accelerometers, MEMS, vibrations, testing, monitoring

INTRODUCCIÓN

Asistimos a la incorporación constante a nuestra vida diaria de numerosos productos construidos mediante tecnología basada en dispositivos microscópicos. En efecto, a la miniaturización generada por la electrónica a partir de la década del '60 se han sumado las técnicas de micro mecanizado de materiales semiconductores, y la conjunción

de ambos ha posibilitado desde hace más de dos décadas la generación de sensores de magnitudes mecánicas de mejoradas características. Ventajas evidentes de esta transformación han sido el bajo costo, el tamaño miniaturizado y el consumo eléctrico reducido. Esto ha posibilitado su incorporación en numerosos dispositivos, los que también debido a la conexión con la internet de las cosas (IoT) generan mejoras en forma constante en funcionalidad, prestaciones y posibilidades de automatización.

Esta revolución de los sensores se ha expandido también hacia todas las industrias en forma prometedora. Sin embargo, en algunos casos la realidad ha demostrado que la

Dirección de contacto:

José Stuardi, Avenida Vélez Sarsfield 1611 Ciudad Universitaria, X5016 CGA, Cdad. de Córdoba, Argentina. Tel: 5353800 interno 29717, jose.stuardi@unc.edu.ar

incorporación sigue demorada teniendo en cuenta que la selección de los sensores se basa en las prestaciones necesarias y particulares para cada área de trabajo y que los SMEM todavía no son capaces de satisfacer algunos requerimientos a un precio competitivo, en cuanto a robustez, nivel de ruido, sensibilidad, etc. Un caso típico es en geología, donde los geófonos siguen dando batalla con sus excelentes prestaciones en cuanto a rango dinámico, bajo ruido, robustez y bajo costo.

Cuando se trata de aplicaciones específicas, tales como en la industria automotriz, los sensores son cuidadosamente instalados, configurados y probados de manera de que cumplan adecuadamente su función. En cambio, este trabajo queda acotado a sensores con carcasa instalables y aptos para aplicaciones más generales, como es el caso de sensores industriales, para investigación y laboratorios, sin pretender ser abarcativo de la gran variedad en características y aplicaciones. Para este tipo de uso están disponibles en el mercado encapsulamientos de SMEM construidos por ejemplo en aluminio anodizado y sellados mediante cemento epoxi, que se caracterizan por su reducido tamaño y poco peso. En efecto, el acelerómetro de capacitancia variable Endevco 7290E, Fig. 1, mide solo 25.4 x 21.5 x 7.6 mm y pesa 10 gramos careciendo de conector eléctrico ya que su salida resulta directamente un cable conductor de varios hilos. Dependiendo de la marca y de la calidad, se encuentran para este tipo de encapsulamientos especificaciones más o menos detalladas, aunque en general la calibración y la respuesta en frecuencias no son datos provistos, a menos que se solicite específicamente un servicio al fabricante. En este tipo de sensores la mejor característica es sin duda su bajo precio, ya que las especificaciones técnicas son limitadas en cuanto a ancho de banda (llegando a unos pocos kHz como máximo), relativamente alta relación señal-ruido y robustez pobre frente a ambientes agresivos (Spencer, 2021). Por el contrario, la posibilidad de medir frecuencias cercanas a 0 Hz, bajo consumo, limitado tamaño y peso juegan a favor en ciertas aplicaciones.



Fig. 1: Acelerómetro de capacitancia variable Endevco 7290E (Fuente Endevco).

La disponibilidad de sensores SMEM en los teléfonos celulares, permite junto con la utilización de aplicaciones específicas en ciertas condiciones una lectura básica de vibraciones a modo de data loggers. En este caso los condicionamientos o limitaciones técnicas resultan no sólo del sensor propiamente dicho, sino en forma importante del software de recolección de datos, que usualmente solo satisface las aspiraciones de un aficionado. Por otro lado, el sistema de sujeción del sensor dentro de la estructura mecánica que conforma el dispositivo y la cadena mecánica de elementos de sujeción entre el chip y el elemento cuya vibración se desea medir genera una función adicional no

deseada de transferencia mecánica. Este efecto incluye la imposibilidad de un buen contacto del cuerpo del celular con las vibraciones. El efecto se torna especialmente importante a medida que se consideran frecuencias más elevadas. Como referencia, una delgada capa de adhesivo es capaz de generar errores importantes en el rango de algunos kHz (Ewins, 2000).

OBJETIVOS

El presente trabajo fue motivado por la necesidad de disponer en corto tiempo y con bajo costo de varios sensores calibrados para investigaciones en el ámbito automotor, lo que condujo a utilizar chips comerciales de SMEM de acceso comercial relativamente sencillo. Ante la incertidumbre generada por las prestaciones de los dispositivos creados, se genera una nueva actividad relacionada con la verificación y contrastación de los registros obtenidos. En este contexto, se analiza la posibilidad de definir acelerómetros útiles para uso general que posean propiedades certeras y confiables, incluyendo actividades de interés tales como *vibration monitoring* y *vibration testing*. Para conseguir este propósito, se revisaron los parámetros fundamentales a tener en cuenta para la selección de los transductores de vibraciones. Mediante la selección de un chip SMEM comercial se analizan las limitaciones a que conlleva una implementación rápida de chips comerciales en algunos casos prácticos, lo que resulta práctica difundida en nuestro medio. El objetivo del trabajo incluye la selección de un chip y el diseño de una carcasa metálica que provea protección mecánica y eléctrica. Si bien estas configuraciones son fabricadas en algunos países de oriente, los fabricantes proveen especificaciones escasas, limitadas y a veces confusas. Basándose en chips comerciales con especificaciones conocidas, se estudian los requerimientos constructivos que permiten explotar a pleno las características eléctricas del sensor, lo que no sería posible sin un adecuado entorno de funcionamiento mecánico y eléctrico. El trabajo muestra los pasos seguidos para poder utilizar en forma segura y confiable el acelerómetro construido, siendo consciente de sus especificaciones reales. Esto fue logrado mediante un testeado y contrastación en baja frecuencia. De esta manera los sensores fueron considerados aptos para su incorporación al catálogo disponible en el Laboratorio de Estructuras de la Facultad.

DISEÑO DEL ACELERÓMETRO

A pesar de que los sensores SMEM digitales poseen una oferta más numerosa en el mercado y son más económicos, se ha preferido la utilización de sensores de salida analógica, ya que cumplen con la premisa de ser un reemplazo de los acelerómetros comerciales instalables en hardware de análisis de señales del tipo industrial. Entre los diversos factores a considerar para el correcto desempeño de un acelerómetro en una aplicación específica, tales como su rango dinámico, etapas de acondicionamiento digital, resolución, cuantización, etc. se encuentra el rango de frecuencia, el que reviste especial importancia en sensores para aplicaciones variadas, donde el rango de frecuencia debe ser controlado. En este caso, debe tenerse también presente el fenómeno de aliasing.

ALIASING

Respecto de la utilización de acelerómetros o chips digitales en base a SMEM para uso general, es importante tener en cuenta el efecto de aliasing, por el cual los contenidos en frecuencias mayores a la mitad de la frecuencia de muestreo aparecen dentro del ancho de banda de medición bajo la forma de frecuencias “plegadas” (Ewins, 2000). Para solucionar este problema, los filtros anti-aliasing deben ser analógicos y actuar antes del conversor analógico-digital. Un filtro efectivo de calidad y ajustable resulta uno de los componentes de más alto costo en los analizadores comerciales. La tendencia actual resulta en mantener alta la frecuencia de muestreo del reloj interno del digitalizador y limitar la frecuencia más baja de muestreo para el usuario, lo que constituye una táctica que evita la necesidad de hardware de filtros efectivos y costosos. Por otro lado, la reducción de la frecuencia de muestreo se puede realizar convenientemente mediante software.

En la Fig. 2 se muestra un diagrama en bloques de un sensor digital, en este caso un acelerómetro Analog Devices ADXL355, catalogado del tipo “ultralow noise” con $25 \mu\text{g}/\text{Hz}$ y que está especificado para uso en monitoreo de condición operativa (*condition monitoring*). En este caso, puede observarse que los sensores triaxiales están provistos de un filtro análogo fijo antes del conversor analógico-digital y de filtros digitales programables después del citado conversor. Las frecuencias mayores que la frecuencia de Nyquist sufren aliasing y pueden generar componentes de error dentro del ancho de banda útil del sensor. En estas frecuencias la respuesta no-plana estará influida fundamentalmente por la respuesta dinámica del sistema mecánico del sensor en cercanías de la resonancia (pico de amplificación) y la atenuación de los -eventuales- filtros tanto analógicos como digitales, Fig. 3. Debe tenerse en cuenta que el caso citado resulta ventajoso desde la perspectiva que, sólo algunos acelerómetros SMEM están provistos de un filtro análogo, y en el mejor de los casos de un filtro simple de un polo, que ayuda a disminuir la ganancia de la respuesta en la frecuencia de resonancia. De esta manera, es posible que la atenuación conseguida en altas frecuencias sea insuficiente y la señal producto del fenómeno de aliasing aparezca por encima del piso de ruido del sensor. Si el requerimiento de atenuación necesario para la aplicación específica en la que se trabaja es mayor que la respuesta del sensor, las mediciones pueden verse afectadas, lo que al menos debe ser tenido en cuenta.

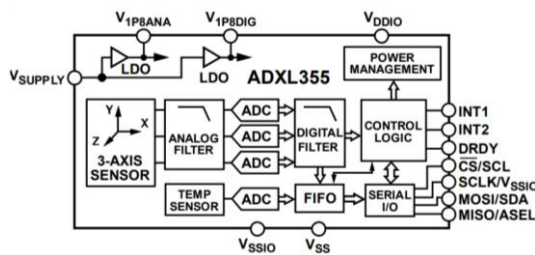


Fig. 2: Diagrama en bloques funcional del sensor ADXL355 (Fuente Endevco).

La necesidad de realizar configuraciones detalladas y tener un control fino de la excitación y de la respuesta no es

precisamente compatible para el propósito de usos generales que se pretende, pero sin embargo lo es con algunas aplicaciones fijas ya citadas en donde se cuenta con un adecuado control de todas las variables del proceso y el rango de soluciones es conocido.

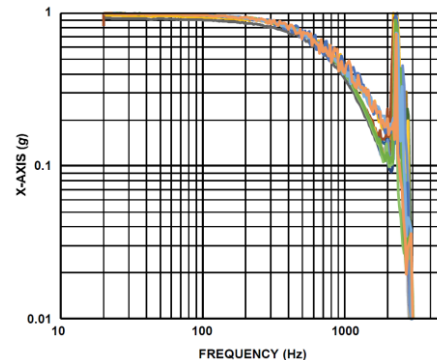


Fig. 3: Respuesta en frecuencia normalizada del ADXL355, eje X, incluye filtro analógico (Fuente Analog Devices).

SELECCIÓN DEL CHIP

Teniendo en cuenta además que no todos los sensores SMEM digitales cuentan con filtros análogos anti-aliasing, la elección de sensores análogos resulta la mejor opción para garantizar sin complicaciones la integridad de la señal en casos generales. Por otro lado, los sensores análogos constituyen un reemplazo natural de sensores similares y resultan fácilmente integrables al hardware disponible de cualquier cadena de medición existente. De esta forma, hacemos uso de acondicionadores de señales comerciales, conteniendo filtros anti-aliasing y digitalizadores de calidad reconocida. Los parámetros de mayor interés en la selección fueron: aplicación tipo industrial, salida analógica, rango mayor a $\pm 10\text{g}$ (estas dos últimas limitan fuertemente las posibilidades) y respuesta en frecuencias cercanas a 0 Hz.

El FXLN8372Q es un chip de acelerómetro tipo SMEM con salida analógica, que pertenece a una serie producida actualmente por NXP Semiconductor Inc. Posee tecnología micromecánica microscópica en sus partes móviles que conforman el sensor interno, estando empaquetado en un módulo de solo 3 x 3 x 1 mm. El sensor tiene como aplicaciones típicas la detección y medición de vibraciones en productos de línea blanca, robótica, dispositivos médicos, monitoreo de actividades deportivas, teléfonos celulares y en general medición de vibraciones en dispositivos asociados a la actividad humana. De las cuatro versiones de la familia, el acelerómetro indicado representa el sensor de ancho de banda más elevado, con una frecuencia máxima de 2700 Hz en los ejes en su plano X e Y, mientras que la frecuencia máxima especificada es de 600 Hz para el eje Z (perpendicular al plano del chip). Por otro lado la aceleración máxima es seleccionable en $\pm 16 / \pm 4 \text{ g}$ (g_r , $g\text{-Range}$) alcanzando una sensibilidad de:

$$S [V/g] = \frac{V_{BYP}}{3.276 \text{ g}}, \tag{1}$$

Donde $V_{BYP} = 1.5 \text{ V}$ (típico) corresponde a la tensión interna estabilizada del chip, lo que conduce a 28.62 mV/g en el rango de 16 g y 114.5 mV/g en el rango de 4 g. Adicionalmente el error típico es de aproximadamente

$\pm 6\%$ en el rango más bajo, según especificaciones. Por su reducido tamaño y consecuentes complicaciones para su manipuleo y la soldadura de sus terminales, el sensor puede ser adquirido montado en una placa impresa de desarrollo (Accelerometer Breakout Board), lo que permite su correcto funcionamiento y manipulación.

DISEÑO MECÁNICO DE LA CARCASA

Con el objetivo de proveer a la placa electrónica que contiene al sensor un entorno adecuado para el funcionamiento, se diseñó una carcasa de acero inoxidable no magnético con un cuerpo principal de forma cilíndrica con dimensiones: diámetro externo 37 mm y una altura 24 mm, con un espesor variable entre 2 y 3 mm. En la parte inferior se diseñó una protuberancia que aloja una rosca hembra estándar de $\frac{1}{4}$ " de 28 hilos para asegurar una fijación eficiente del acelerómetro.

La protección generada por la carcasa es efectiva tanto desde el punto de vista mecánico como eléctrico, ya que la jaula de Faraday resulta efectiva para garantizar el funcionamiento sin problemas ni interferencias cuando el sensor es utilizado en ambientes ruidosos desde el punto de vista electromagnético.

Para proveer un adecuado contacto con la placa inferior de la carcasa del sensor desde el lado interno, la placa de circuito impreso fue pegada mediante una delgada capa de adhesivo epoxi de baja contracción residual y de baja conductividad eléctrica.

La tapa superior fue diseñada de manera de ser instalada mediante interferencia mecánica con la carcasa cilíndrica. En el momento del montaje final la tapa fue sellada mediante adhesivo tipo cianoacrilato para garantizar estanqueidad de la unidad.

La carcasa del sensor fue modelada mediante elementos finitos con el objeto de obtener sus propiedades dinámicas. El criterio de diseño utilizado fue evitar la presencia de frecuencias propias de la carcasa dentro del rango de frecuencias de medición considerada, para evitar interferencias mecánicas. En la Fig. 4 se muestra un modelo de elementos finitos de la carcasa y la forma del primer modo consistente en una flexión de su placa de base alrededor del apoyo central fijo por su base, y que se corresponde con una frecuencia de 1984 Hz. La frecuencia máxima del sensor en los ejes X e Y puede limitarse a valores próximos a 1 kHz, para asegurar una baja incidencia del error debido a deformaciones mecánicas de la carcasa.

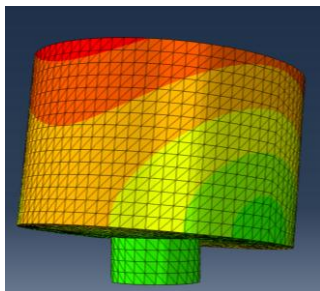


Fig. 4: Modelo de Elementos Finitos de la carcasa del sensor, Modo 1: 1984 Hz.

CONEXIONADO ELÉCTRICO

La carcasa del sensor se encuentra aislada de la tierra eléctrica y de la placa electrónica. El sensor se alimenta mediante conector tipo Amphenol C091-31G008-200-2 que garantiza la continuidad de la malla eléctrica con el cable también mallado que conecta el sensor con un módulo de alimentación eléctrica. Este último consiste en un pequeño gabinete conteniendo dos baterías de 1.5 V, conectores BNC hembra aisladas de chasis para las salidas al digitalizador de señales y llaves del tipo inversoras para posibilitar la selección de la magnitud máxima de aceleración seleccionada.

CALIBRACIÓN

1) Sensibilidad

La salida de los sensores consiste en una señal de offset de unos 0.75 V (típico) $\pm 5\%$. La estabilidad de este voltaje está influido además por la temperatura: convertidos los errores desde las especificaciones, en términos prácticos resultan en ± 40 mg para una variación de temperatura de utilización típica de unos $\pm 20^\circ\text{C}$, lo que conservativamente representa menos del 1% de error. Considerando además que la sensibilidad tiene un error según especificaciones $\pm 6\%$ (valor especificado para rango ± 4 g) el error de apreciación no supera el $\pm 7\%$. Esta magnitud, si bien es comparable con la de acelerómetros piezoeléctricos de uso general (5 a 10%) puede no resultar compatible con ciertas mediciones de nivel, lo que justifica algunos esfuerzos para la calibración. La calibración de cada espécimen en forma individual están en este caso representados para cada acelerómetro por un par de valores: V_{0g} (tensión para 0 g) y la sensibilidad S (V/g).

Medición de la tensión de offset

La tensión de offset se mide mediante un dispositivo que permite el giro de los ejes X, Y, Z del sensor para obtener las mediciones máximas y mínimas correspondientes a la dirección vertical en el sentido $+1g$ y $-1g$ respectivamente. Los registros son realizados bajo condiciones de bajo ruido mecánico, y promediados para conseguir un valor estable. Para algunas aplicaciones será menester el uso de filtros pasa altos ó un procesamiento de señal digital posterior para eliminar la componente DC que genera el sensor. Mediante la semidiferencia de los valores registrados se obtiene la sensibilidad S del sensor [mV/g] en cada eje para el caso estático. A efectos de chequear la constancia de este valor para otras frecuencias se realiza una contrastación en mesa vibratoria.

Contrastación en mesa vibratoria

Se realizaron mediciones experimentales de las funciones de respuesta de tres distintos especímenes de los sensores construidos respecto a un cuarto sensor comercial de calidad reconocida y utilizado para contrastación (Endevco 43A18). El ensayo fue llevado a cabo en una mesa vibratoria con una señal de barrido creciente (chirp) de frecuencia entre 0-50 Hz (ver Fig. 5), rango que resulta de utilidad para ensayos en vehículos automotor.

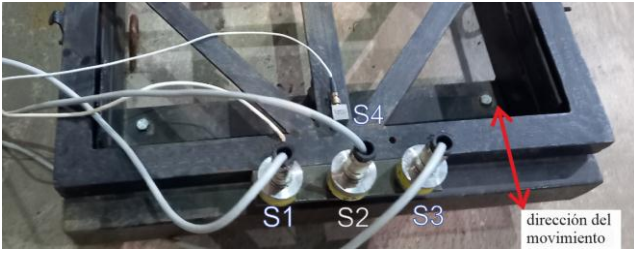


Fig. 5: Sensores montados en mesa vibratoria horizontal: tres acelerómetros construidos y acelerómetro comercial de contrastación.

Se completaron dos etapas con amplitudes de vibración distintas: 6 mm entre 0-20 Hz y 0.3 mm entre 20-50 Hz de manera de no saturar la aceleración máxima de los sensores.

Las señales se procesaron mediante el método de los tres sensores (Sleeman et al., 2006), obteniéndose las funciones de respuesta en frecuencia FRF relativas de los tres sensores respecto del sensor calibrado utilizado como referencia. De esta manera la función de la mesa queda reducida a generar un movimiento idéntico de los sensores instalados, y ninguna otra especificación resulta relevante. Las curvas FRF se corrigieron luego atendiendo a la curva de calibración del acelerómetro disponible. Se registraron en total 60 minutos de señales de chirp en cada eje X del sensor, con lo que se obtuvieron coherencias excelentes en el rango 5-45 Hz. Las curvas del gráfico de FRF de la Fig. 6 se consideran útiles entre 5 a 30 Hz debido a limitaciones mecánicas de la mesa vibratoria. Dentro de este rango, el resultado muestra la imprecisa calibración previa efectuada en forma estática con la gravedad y una aceptable variación de la sensibilidad (*flatness*), que resultó en todos los casos menor a 0.9% en el rango considerado útil.

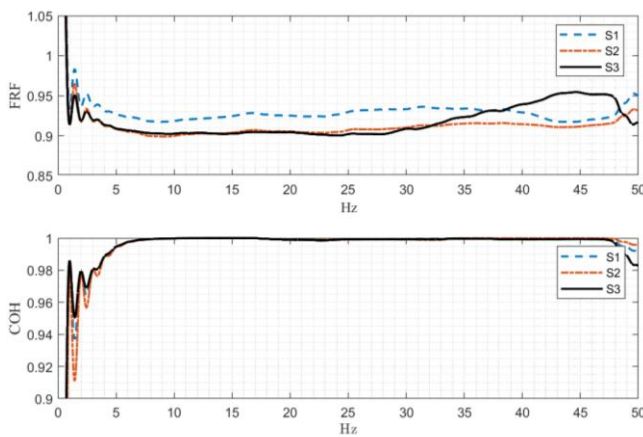


Fig. 6: Funciones de Respuesta en Frecuencia de tres sensores respecto a un acelerómetro piezoeléctrico calibrado utilizado como contrastación.

2) Ruido propio

El ruido propio de los acelerómetros en condiciones operativas fue medida mediante la aplicación del método de los tres sensores (Sleeman et al., 2006) en condiciones de bajo ruido mecánico. El método consiste en la medición simultánea de tres sensores, en este caso de idéntica construcción, en condiciones tales que estén sometidos a la misma excitación mecánica. Los sensores fueron montados próximos entre sí sobre una placa metálica de elevado espesor y esta fue apoyada mediante tres puntos en forma

directa sobre el suelo firme, en el que no se percibieron fuentes de vibraciones identificables.

En estas condiciones, es posible separar las señales coherentes entre los sensores, que corresponden al ruido mecánico de fondo, de las señales no coherentes, que representan al ruido propio de cada uno de los especímenes medidos. Además, en virtud del método es posible la determinación de las funciones de transferencia relativas entre los sensores. Utilizando un sensor calibrado de referencia, es entonces posible una calibración relativa. Para la determinación de las funciones de transferencia, resulta necesario que el nivel de ruido propio del sensor se mantenga por debajo del ruido mecánico de excitación natural, lo que no representa el caso de los sensores SMEM utilizados, por los que las funciones de transferencia debieron ser medidas mediante el procedimiento ya descrito.

La longitud total de los registros alcanzó 1000 s, y las densidades espectrales de potencia fueron estimadas mediante el método de Welch (Lalanne, 2014), utilizando ventanas de 60 s y un *overlapping* de 50%.

En la Fig. 7 se muestra la densidad espectral del ruido propio del acelerómetro con sensor MEMS FXLN8372Q, en dirección Z (curva roja), configurado en rango de aceleración máxima $\pm 16g$. Para frecuencias mayores a 10Hz, el valor medido puede ser representado por una recta entre los puntos con $320 \mu g/\sqrt{Hz}$ para 15Hz y $280 \mu g/\sqrt{Hz}$ para 900 Hz. El valor promedio en el rango 0-1000 Hz corresponde con $306 \mu g/\sqrt{Hz}$ mientras que las especificaciones del sensor indican un valor constante de $280 \mu g/\sqrt{Hz}$. El gráfico inferior de la figura muestra la

misma densidad de ruido, pero expresada en $dB \text{ ref. } 1 \frac{g}{\sqrt{Hz}}$.

La curva inferior de ambos gráficos (azul) corresponde con el ruido adicional medido, esto es vibraciones existentes y ruido eléctrico del resto del equipamiento.

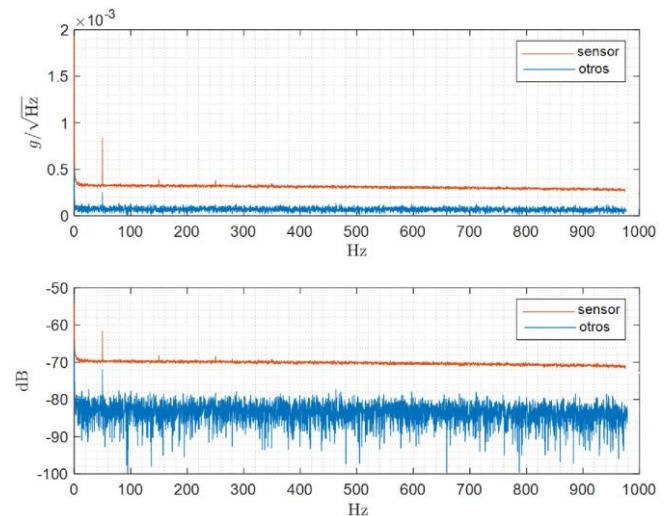


Fig. 7: Determinación de la amplitud de densidad espectral del ruido del sensor.

El comportamiento del ruido propio del sensor puede ser representado por una recta levemente decreciente con la frecuencia, sin embargo el ruido crece notablemente para

bajas frecuencias ($f < 10$ Hz). El modelo de crecimiento es de la forma $1/f^\alpha$, con $\alpha = \text{constante}$. que es típico de los equipos electrónicos debido a la fluctuación de las propiedades de los materiales y variaciones de temperatura. Más específicamente, un modelo del ruido del sensor está compuesto entonces por la superposición de un ruido de amplio rango que domina las frecuencias elevadas y un ruido rosa del tipo $1/f^{1.0}$ predominante en frecuencias bajas. Realizado los ajustes correspondientes, se tiene para el sensor construido que el PSD del ruido propio puede ser expresado como:

$$PSD_{noise} = 10 \log \left(8.2 \cdot 10^{-8} - 1.65 \cdot 10^{-11} f + 1.08 \cdot 10^{-7} \frac{1}{f} \right) [\text{dB}] \quad (2)$$

En la Fig. 8 se observa la curva del PSD del ruido medido junto con la curva de ruido del modelo calculado según ec.(2) en un rango de frecuencias amplio (arriba) y un detalle para bajas frecuencias (abajo). Sobre la ordenada derecha se observa una escala en dB ref. $1. g^2/\text{Hz}$. En términos prácticos, se tiene por ejemplo que para la frecuencia de 1 Hz el ruido asciende a $436 \frac{\mu g}{\sqrt{\text{Hz}}}$. Por otro lado, la ec.(2) representa en forma explícita el ruido y es utilizada en los cálculos de ejemplos de aplicación que siguen.

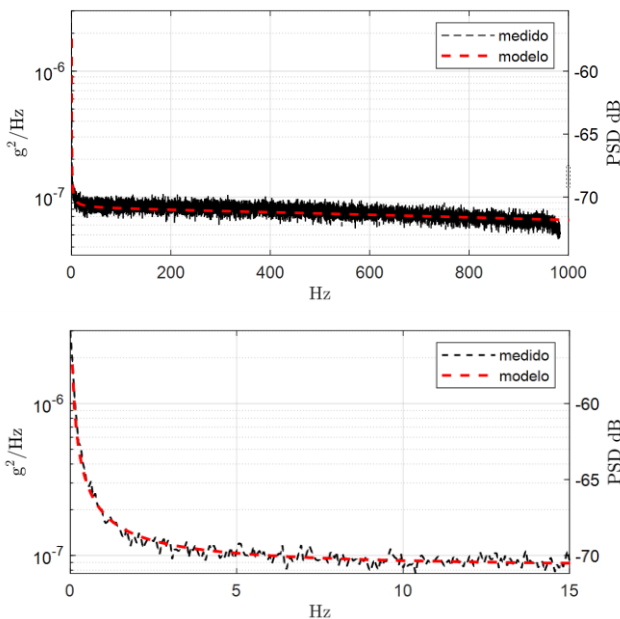


Fig. 8: PSD del ruido del sensor.

EJEMPLOS DE APLICACIÓN

1) Caso monitoreo de vibraciones en máquina

Para el caso de monitoreo de vibraciones en máquinas se considera la norma ISO 10816-1 “Mechanical vibration – evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts” (ISO, 2016). La norma establece recomendaciones para la medición y evaluación de vibraciones en máquinas en partes no rotantes (cojinetes) como forma de monitoreo operacional y diagnóstico. Respecto del rango de frecuencias, debe ser suficientemente amplio como para cubrir el espectro de frecuencias de la

máquina, en términos generales entre 10 Hz y 1 kHz, aunque dependiendo del caso en particular, diferentes rangos son posibles. Mediante el criterio de la magnitud de la vibración, se definen límites de vibración absolutos para distintos tipos de máquinas y distintas condiciones de mantenimiento consistentes con cargas dinámicas y transmisibilidad al entorno. Estos límites, expresados como severidad de vibración en valores rms y en mm/s, ascienden a 0.28 para máquinas de Clase I en estado nuevo o perfecto estado, (valor mínimo en máquinas pequeñas) hasta 45 para máquinas Clase IV en condiciones de daño severo (valor máximo en grandes instalaciones).

Tomando como referencia el valor mínimo de severidad especificado por la norma, se analiza a continuación la posibilidad de mediciones libres de distorsión mediante distintos acelerómetros, teniendo en cuenta que el ruido propio del sensor debe permanecer limitado. En efecto, el excesivo ruido instrumental es un fenómeno que tiene lugar cuando la amplitud de señal útil no es considerablemente mayor que el nivel de ruido de fondo de la cadena instrumental. Esto origina una relación señal-ruido pobre y un deterioro de la calidad de la señal útil registrada, generando errores tales como el aumento del valor eficaz de la señal registrada, contaminación de los espectros y hasta el eclipsamiento total de la señal bajo el ruido. En el presente caso, la amplitud de la señal útil medida en aceleraciones aumenta linealmente con la frecuencia, por lo que podría esperarse ruido instrumental especialmente en bajas frecuencias. Considerando una señal de aceleración causada por una fuente monofrecuente con severidad mínima y frecuencia variable, se cuantifica la relación entre el valor eficaz de la señal y del ruido del sensor siguiendo la definición tradicional de relación señal-ruido (SNR). El valor eficaz del ruido se reconstruye a partir de la densidad espectral del ruido del sensor, sin tener en cuenta otras fuentes.

En la Fig. 9 se muestra comparativamente la SNR en función de la frecuencia de la señal útil para los sensores Freescale FXL8372Q (curva roja) y un acelerómetro industrial de propósito general, como el Wilcoxon 786A (curva azul). Además de observarse una diferencia de unos 35 dB entre ambas curvas, es evidente que el acelerómetro Wilcoxon permite mediciones libres de distorsión, pero el acelerómetro F8372Q solo alcanza relaciones SNR razonables en el rango de altas frecuencias.

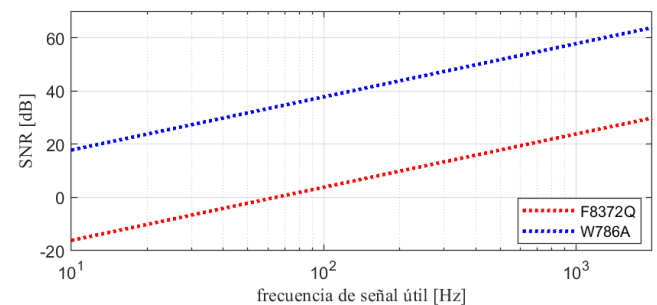


Fig. 9: Relación señal-ruido comparativa para mediciones de monitoreo de vibraciones.

Además, desde el punto de vista determinístico, si se pretendiera no solapar la señal con el ruido, deberían tenerse en cuenta los factores de pico de las señales. En el caso de la señal útil, supuesta armónica, el factor de pico es

de $\sqrt{2}$ debiéndose considerar el mínimo del pico, mientras que debido al carácter aleatorio del ruido se toman en cuenta los picos máximos. Se podría asumir, en el caso de una señal gaussiana con media nula, un recorte en $\pm 2\sigma$ (desviación estándar) lo que asume un intervalo de confiabilidad de 0.95. De esta manera, la señal debe ser multiplicada por 0.5 y el ruido por 4 empeorando la relación señal-ruido (ahora de pico PSNR) a considerar, (Bendat, 2000).

Como conclusión se puede expresar que la primera limitación del acelerómetro se encontrará en el rango de frecuencias, que resulta muy pobre en su límite superior para las mediciones de una gran generalidad de máquinas. Por otro lado, el ruido propio del sensor SMEM solo permite mediciones a partir de algunos cientos de Hz.

2) Caso medición sensible: Estudio de pre-instalación de resonador magnético

A continuación, se considera el registro de vibraciones para determinar la posibilidad de instalación de un resonador magnético (MRI) tipo RM GE 1,5T y definir eventualmente un sistema de aislamiento en la fundación de la máquina. El fabricante especifica vibraciones máximas del sitio de instalación por medio de un espectro límite, tal como se ve en la Fig. 10 (GE Healthcare, 2010). El manual de instalación indica además que los registros deben ser tomados como promedio lineal de 20 mediciones con una resolución en frecuencia de 0.125 Hz y provisto de ventana de Hanning.

Se muestra en forma comparativa en la Fig. 11 la curva de requerimientos espectrales del equipo MRI (trazo negro) vs. los espectros de ruido obtenibles mediante los sensores FXL8372Q (rojo), Wilcoxon 786A (azul) y adicionalmente de un piezoeléctrico de mayor sensibilidad, tal como el Endevco 43A18 de 500 mV/g (cyan). Del análisis de la figura se concluye que queda totalmente excluida la posibilidad de mediciones con sensores con niveles de ruido importantes como el FXL, ya que inclusive las mediciones se hacen también dificultosas con sensores de propósito general como el 786A. El uso de un acelerómetro de 500mV/g aporta sensibles mejoras de la SNR especialmente a partir del rango 5-10 Hz.

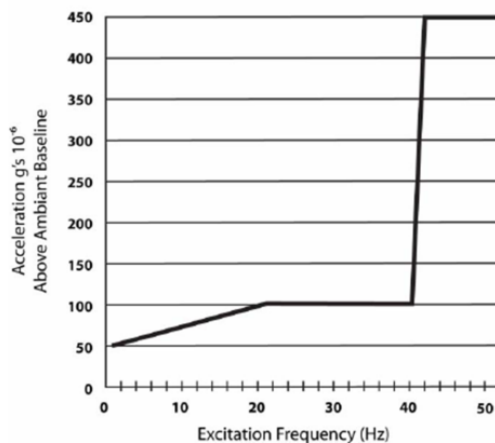


Fig. 10: Espectro de vibraciones máximas para el sitio de instalación MRI GE 1.5T típico (GE Healthcare, 2010).

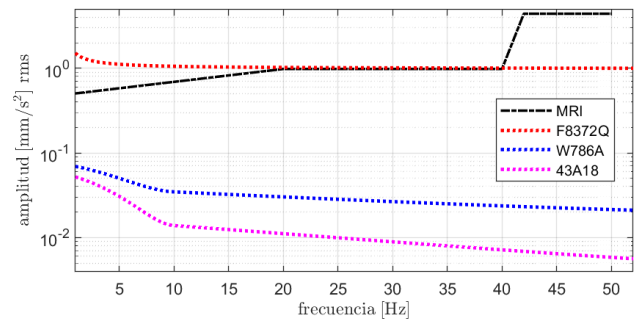


Fig. 11: Nivel de ruido comparativo para mediciones de pre-instalación MRI, ventana T=8 s.

3) Utilización para mediciones en moto vehículos

En el presente caso de utilización se prevé el registro de aceleraciones verticales en un vehículo en marcha. Los desplazamientos verticales de las ruedas delanteras y traseras pueden ser obtenidos por cálculo partiendo de un modelo calibrado del vehículo, en donde la respuesta del sistema es medida y la excitación consiste en el desplazamiento en las ruedas debido a la rugosidad desconocida del terreno. El movimiento de las ruedas delantera y trasera se supone idéntico pero desfasado en el tiempo debido a la velocidad constante del vehículo. De esta forma se logra un método alternativo para la medición de la rugosidad del suelo (Liu et al., 2020), (Wang et al., 2020). El procedimiento puede naturalmente invertirse haciendo circular el vehículo por una descripción de camino conocida y calibrar entonces el modelo mediante la medición de la respuesta. En todos los casos, y prescindiendo de los parámetros que definen la función de respuesta del vehículo, una versión filtrada de la señal registrada es sometida a un proceso de doble integración para obtener desplazamientos, por lo que la frecuencia de corte del filtro pasa altos juega un papel preponderante en el análisis.

Se determina a continuación el mínimo umbral de ruido del acelerómetro analizado expresado en mm rms, para distintas configuraciones de la frecuencia de corte del filtro pasa altos utilizado en el procesamiento. El cálculo parte de la densidad espectral de ruido del sensor expresada por la ec.(2) e integrada entre la frecuencia del filtro pasa altos f_{pa} y la frecuencia máxima (1kHz). En la Fig. 12 se muestra la variación del valor eficaz rms de los desplazamientos calculados y provenientes del ruido propio del sensor. Se observa que los desplazamientos superan a 1 mm para frecuencias menores a 0.2 Hz y alcanza a varios milímetros para frecuencias de una décima de Hz.

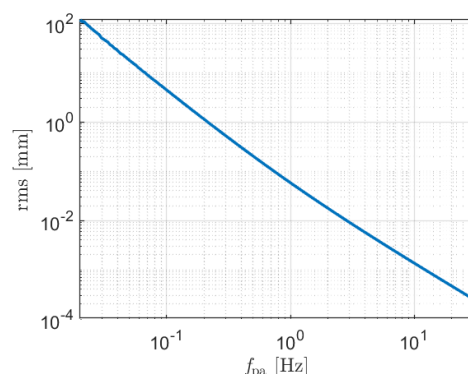


Fig. 12: Valor eficaz del desplazamiento registrado mediante el sensor construido en función de la frecuencia de corte del filtro pasa altos.

Finalmente, se comparan en la Fig. 13 las densidades espectrales PSD [$\text{m}^2 / (\text{ciclos/m})$] características de distintos tipos de caminos y expresados en función de la frecuencia espacial [ciclos/m] con el umbral de ruido obtenible con el acelerómetro analizado. Según la norma ISO 8608 (ISO, 2016) se definen distintos tipos de caminos delimitados en el gráfico por las líneas de color azul, desde tipo A hasta tipo H con rugosidad creciente. Por otro lado, las líneas punteadas negras representan la densidad espectral del umbral de ruido obtenible cuando el vehículo circula a velocidades de 1, 5, 10, 20 y 50 m/s sin error estadístico. Estas líneas representan en definitiva la densidad espectral del ruido en frecuencia temporal que ha sido convertida a densidad espectral en frecuencia espacial por medio de la velocidad. Del gráfico es evidente, que mediciones con bajo nivel de ruido serían solo posibles para caminos de alta rugosidad (tipo rural) y en una banda de frecuencias espaciales elevada en forma prácticamente independiente de la velocidad del vehículo seleccionada para la toma de registros.

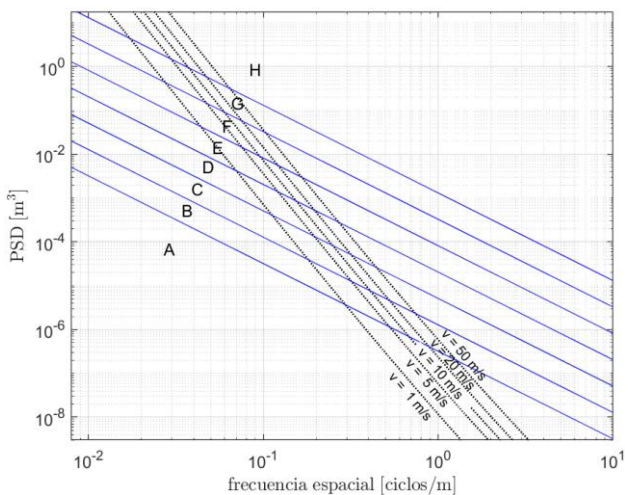


Fig. 13: PSD [m^3] del umbral de ruido del sensor para distintas velocidades del vehículo y PSD de caminos según norma ISO 8606.

CONCLUSIONES

A partir de una plaqueta de desarrollo conteniendo un sensor de aceleraciones triaxial de tipo SMEM de bajo costo y de salida analógica se construyó un acelerómetro compacto de aspecto comercial y mecánicamente apto para un uso en mediciones de vibraciones en ambientes industriales, dentro de las características especificadas. El acelerómetro es una unidad sellada construida en acero, que resulta compacta y se puede fijar mediante rosca o base magnética. La carcasa, el posicionamiento y el pegado de la plaqueta fueron realizados teniendo en cuenta de proveer una adecuada función de transferencia mecánica desde la pieza obra al sensor SMEM y evitando interferencias tanto mecánicas como eléctricas.

Específicamente el acelerómetro construido tiene un rango de frecuencias máximo entre 0-1000 Hz con una sensibilidad máxima de 114.4 mV/g, aunque otras especificaciones son posibles utilizando distintos sensores

SMEM. Las características eléctricas del sensor utilizado hacen que su utilización en general sea aplicable a mediciones en dispositivos mecánicos, estructuras civiles y en vibraciones en humanos, donde la respuesta en baja frecuencia es de suma importancia. Uno de las características consideradas ha sido su respuesta analógica libre de aliasing y la posibilidad de medir frecuencia nula, lo que facilita la integración de las señales.

El trabajo avanza sobre las posibilidades de utilización de estos dispositivos de bajo costo en algunas áreas de interés, tales como monitoreo de vibraciones en máquinas, instalación de equipos sensibles y mediciones en motovehículos mostrando que, a pesar de ser utilizados en la industria y la investigación, solo en circunstancias controladas su desempeño es seguro. Ya que resulta menester conocer las prestaciones del conjunto ensamblado, especialmente la sensibilidad, respuesta en frecuencia, y los niveles de ruido propio obtenibles, estas características fueron medidas en forma parcial y a partir de registros experimentales. El análisis realizado ha permitido la utilización del dispositivo demostrando una gran robustez, no presentando inconvenientes ni desde el punto de vista eléctrico ni mecánico. Los acelerómetros desarrollados en el presente proyecto han demostrado ser una opción de excelente relación calidad/precio, que explotan a un máximo la capacidad del chip SMEM utilizado, aunque las limitaciones han quedado evidenciadas en los análisis de los casos de interés. Los resultados muestran que es necesario analizar y configurar en detalle las mediciones y el pos procesamiento necesitado para asegurar el cumplimiento de los objetivos.

Frente al entusiasmo que despierta el disponer de tecnología moderna y de precio reducido el trabajo demuestra que para la utilización de estos chips es menester tener un buen control de todos los parámetros involucrados para conseguir mediciones libres de distorsión, dependiendo del ámbito o área del conocimiento. En experiencia de los autores de este trabajo, es fácil caer en instalaciones de sensores digitales no debidamente verificadas, donde suceden fenómenos de compresión del tiempo e inesperadas respuestas en frecuencia no lineales. La calidad y confiabilidad de los sensores SMEM demostrada en las últimas décadas, y su extraordinaria difusión y bajo precio asociado, hacen pensar que las prestaciones serán mejoradas en forma importante para sensores comerciales, por lo que su aplicación en muchos campos del conocimiento se expandirá, como por ejemplo en el ámbito de monitoreo. Hasta entonces, una buena práctica consiste en tener precaución basada en el análisis exhaustivo de las prestaciones y requerimientos.

REFERENCIAS

- [1] Bendat J. S. y Piersol A. G., (2000), *Random data: analysis and measurement procedures*, John Wiley & Sons, New York.
- [2] Ewins D. J., (2000), *Modal Testing: Theory, Practice and Application*, Research Studies Press Ltd., Baldock, Hertfordshire, UK.
- [3] GE Healthcare, (2010), Optima MR450w Preinstallation Manual, Direction 5670001, Revision 3.0, General Electric Company, Waukesha, USA.

- [4] ISO 10816-1, (2016), Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts Part 1: General guidelines.
- [5] ISO 8608, (2016), Mechanical vibration - Road surface profiles - Reporting of measured data.
- [6] Lalanne C., (2014), *Mechanical Vibration and Shock Analysis, Random Vibration - Volume 3*, Iste Ltd. and John Wiley & Sons, Inc., Great Britain.
- [7] Liu W., Wang R., Ding R., Meng X. y Yang L., (2020), "On-line estimation of road profile in semi-active suspension based on unsprung mass acceleration", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 135.
- [8] Sleeman R., van Wettum A. y Trampert J., (2006), "Three-Channel Correlation Analysis: A New Technique to Measure Instrumental Noise of Digitizers and Seismic Sensors", *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 96, pp. 258-271.
- [9] Spence E., (2021), "What You Need to Know About MEMS Accelerometers for Condition Monitoring", tomado de www.analog.com, agosto 2021.
- [10] Wang G., Burrow M. y Gurmel G., (2020), "Study of the Factors Affecting Road Roughness Measurement Using Smartphones", *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 26..