



ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS ENCODERS ÓPTICOS LINEALES ANTE VIBRACIONES UTILIZANDO ELEMENTOS PASIVOS DE PROTECCIÓN

JESÚS LÓPEZ¹, MARIANO ARTÉS¹, IGNACIO ALEJANDRE²

¹Universidad Nacional de Educación a Distancia

Departamento de Mecánica

C/ Juan del Rosal 12, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid, España

²Fagor S. Coop.

Barrio de San Andrés 18, 20500 Mondragón, Guipúzcoa, España

(Recibido 5 de marzo de 2009, para publicación 4 de septiembre de 2009)

Resumen – Los encoders ópticos son sensores de desplazamiento cuya precisión se ve fuertemente influenciada por la presencia de vibraciones, siendo los propios fabricantes los que recomiendan la utilización de ciertos dispositivos acoplados al encoder cuando la amplitud de aceleración a la que se encuentra sometido supera un determinado valor. En este artículo se realiza un estudio comparativo entre encoders ópticos lineales transmisivos y reflexivos, multicampo y de un solo campo, cuando se utilizan elementos metálicos y elastoméricos como protección pasiva ante vibraciones. La metodología utilizada se basa en el análisis del comportamiento del encoder en un rango de frecuencias obteniéndose un diagrama de precisión que permite comparar el comportamiento de los diferentes tipos de encoders en distintas situaciones.

Palabras clave – Encoders ópticos, protección pasiva, ensayos a vibraciones.

1. INTRODUCCIÓN

Los encoders ópticos son sensores de desplazamiento de precisión micrométrica y resolución nanométrica. La precisión de estos instrumentos se encuentra fuertemente influenciada por factores externos tales como la temperatura o la deformación [1] y la vibración. En lo que se refiere a este último factor, no hay mucha información y la que hay en la mayoría de los casos consiste en patentes que no proporcionan apenas información sobre el comportamiento del encoder en un rango determinado de frecuencias. Existen trabajos en los que se trata de reducir las vibraciones a las que se encuentran sometidos estos sensores mediante el efecto de compensación de una masa destinada a tal fin [2], llenando la ranura donde se aloja la regla con un compuesto de sellado [3] o bien aislando el encoder de la fuente de vibración por medio de una regleta metálica [4]. En lo que respecta a la documentación de los fabricantes, ésta se limita a especificar que sus productos cumplen con las exigencias impuestas por ciertas normas.

Para determinar la medida, los encoders se basan en los patrones de interferencia entre dos retículas en presencia de luz, a partir de los cuales se generan señales senoidales sobre las que se efectúa la medida del desplazamiento relativo entre ambas. Para ello, una de las retículas va impresa a lo largo de una regla que determina el desplazamiento máximo que se puede medir con el sensor. La otra retícula va alojada en el módulo de escaneado. Tradicionalmente esta retícula se divide en subretículas generando señales eléctricas de medida desfasadas entre sí constituyendo un sistema de escaneado multicampo. Actualmente, mediante un fotodetector especialmente estructurado, la tendencia es realizar el escaneado sobre una sola área de un tamaño lo suficientemente grande para que la medida no se vea significativamente afectada por un deterioro localizado de la zona de escaneado. Por otro lado, existen dos tipos de reglas dependiendo del material utilizado para su construcción, vidrio y acero. La utilización de reglas de vidrio es la base de los encoders transmisivos mientras que la regla de acero se utiliza en los reflexivos, en los que, como su nombre indica, la superficie reflectante de la regla devuelve la luz al módulo de escaneado donde, contrariamente a lo que ocurre en los transmisivos, se alojan los fotodetectores.

Atendiendo a las tipologías descritas se han seleccionado tres encoders de diferentes fabricantes para el estudio comparativo. De esta manera uno de los encoders es del tipo transmisivo multicampo, otro es del tipo transmisivo de un solo campo y el restante es un encoder reflexivo. Los tres presentan el mismo curso de medida (70 mm), el mismo periodo de retícula (20 μm), la misma precisión (5 μm) y señales de medida (1 Vpp); sin embargo, difieren en la forma constructiva y en el elemento de protección pasiva que utilizan cada uno de ellos. Los encoders transmisivos utilizan una regleta metálica antivibración con diseños mecánicos distintos. El encoder reflexivo utiliza como protección a vibraciones una banda de material elastomérico integrada en el perfil de aluminio del encoder. Esta banda va fijada al encoder de forma permanente. La utilización de una banda elastomérica por parte de los fabricantes ha propiciado realizar un estudio sobre cómo se comportarían los encoders cuando se interpone una plancha de este material entre la superficie de la máquina y el encoder.

En este artículo se realiza un estudio comparativo entre los encoders mencionados cuando se utilizan elementos metálicos y elastoméricos como protección pasiva a vibraciones. La metodología utilizada se basa en el análisis del comportamiento del encoder en un rango de frecuencias determinado [5] tal que es posible obtener un diagrama de precisión que permite comparar los encoders en las distintas situaciones.

2. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

El método [5] se basa en el concepto de “error de medida en un rango de frecuencias”. Los métodos tradicionales solamente miden la aceleración para un determinado valor de frecuencia de resonancia. Realmente, en condiciones de operación no es la aceleración el factor representativo del comportamiento del encoder sino el error de medida que comete el encoder bajo la solicitud en particular a que se vea sometido. Como resultado de la aplicación del método se puede evaluar el comportamiento del encoder al obtener una gráfica de precisión que muestra el error de medida que comete el encoder para todas las frecuencias del rango de trabajo seleccionado.

El encoder genera dos señales senoidales correspondiendo al movimiento relativo entre las retículas. Las señales están desfasadas entre sí 90° de tal manera que si se representa la amplitud de una de las señales frente a la otra se obtiene una figura de Lissajous. Si la amplitud de estas señales es la misma la figura de Lissajous será un círculo cuando se haya completado un periodo de las señales de medida, lo que corresponderá para los encoders seleccionados con una medida de 20 μm . De esta manera, calculando el ángulo abarcado por la figura de Lissajous se puede estimar el error cometido por el encoder (Fig. 1).

3. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Para poder determinar el diagrama final de error en función de la frecuencia de la excitación a que se ve sometido el encoder es necesario implementar un dispositivo experimental como el mostrado en la Fig. 2. En esta figura se puede observar como el encoder se posiciona sobre un útil para ser sometido a un barrido sinusoidal en frecuencias mediante el vibrador electrodinámico. Para ello se hace uso de un sistema de control en lazo cerrado con un acelerómetro sobre la superficie del útil en contacto con el encoder como punto de referencia. Los parámetros fundamentales a fijar en el controlador y que determinan la severidad del ensayo son el rango de frecuencias, la amplitud de la vibración y la duración del barrido. La Norma Europea EN 60068-2-6 [6] proporciona los valores de estos parámetros para ensayos de durabilidad o búsqueda de frecuencias críticas. Se ha escogido un rango de frecuencias de 20 a 2000 Hz, para tener una amplia representación del comportamiento del encoder. En esta misma Norma también figuran distintos valores para la amplitud de la vibración. Para los ensayos se ha fijado un valor de 200 ms^{-2} , dado que este es el máximo valor de amplitud de la aceleración especificado por los fabricantes para los encoders transmisivos de un solo campo y multicampo de tal manera que se asegure un adecuado comportamiento del sensor utilizando la protección a vibraciones aportada por la regleta metálica. El encoder reflexivo multicampo también se ha ensayado a 100 ms^{-2} , siendo este el límite especificado para la banda de material elastomérico. Con respecto a la duración del ensayo, se ha seleccionado una velocidad de barrido lineal de 22 Hz/s, resultando en una duración total de 90 segundos para cada ensayo.

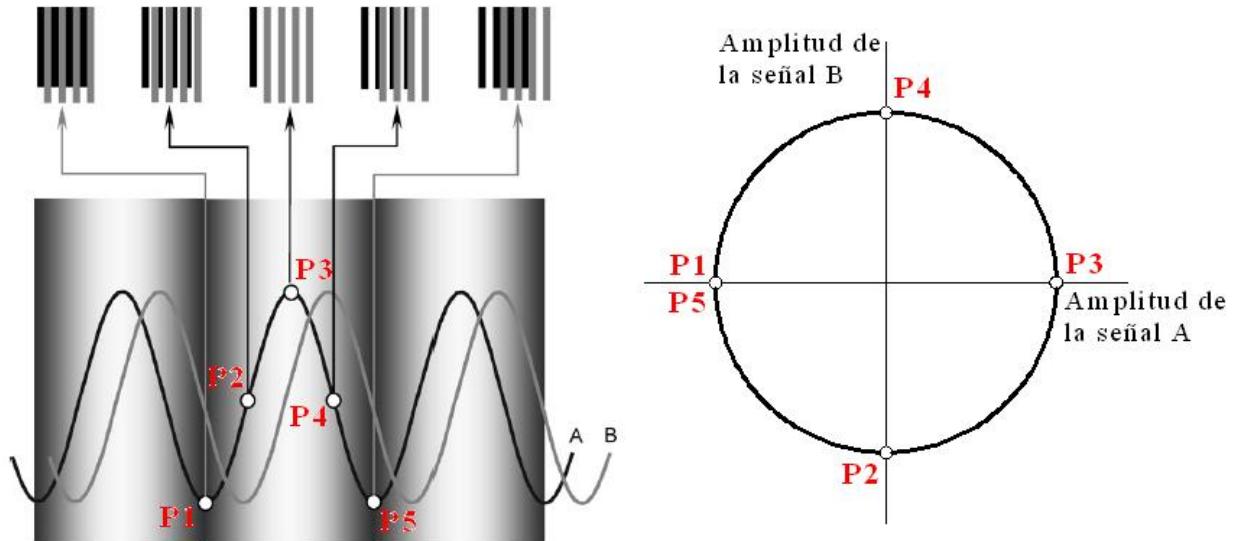


Fig. 1. Metodología para el cálculo del error cometido por el encoder.

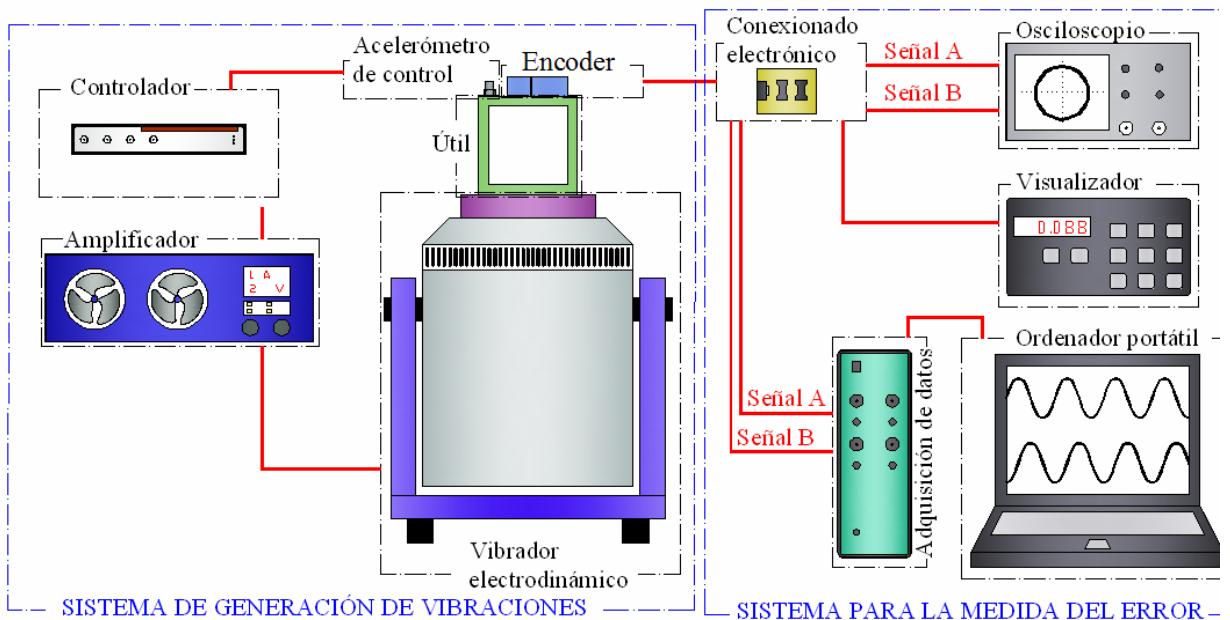


Fig. 2. Dispositivo experimental.

En la citada Fig. 2 se puede observar también la implementación realizada para la medida del error del encoder. El osciloscopio permite visualizar la figura de Lissajous en tiempo real, con lo que se puede detectar cualquier anomalía durante el ensayo. Para el cálculo de las gráficas de precisión es necesario registrar las señales de medida del encoder en un módulo de adquisición de datos para procesarlas posteriormente mediante un programa elaborado en MATLAB. Finalmente el DRO completa el sistema, dando la lectura de medida y sirviendo como fuente de alimentación al encoder.

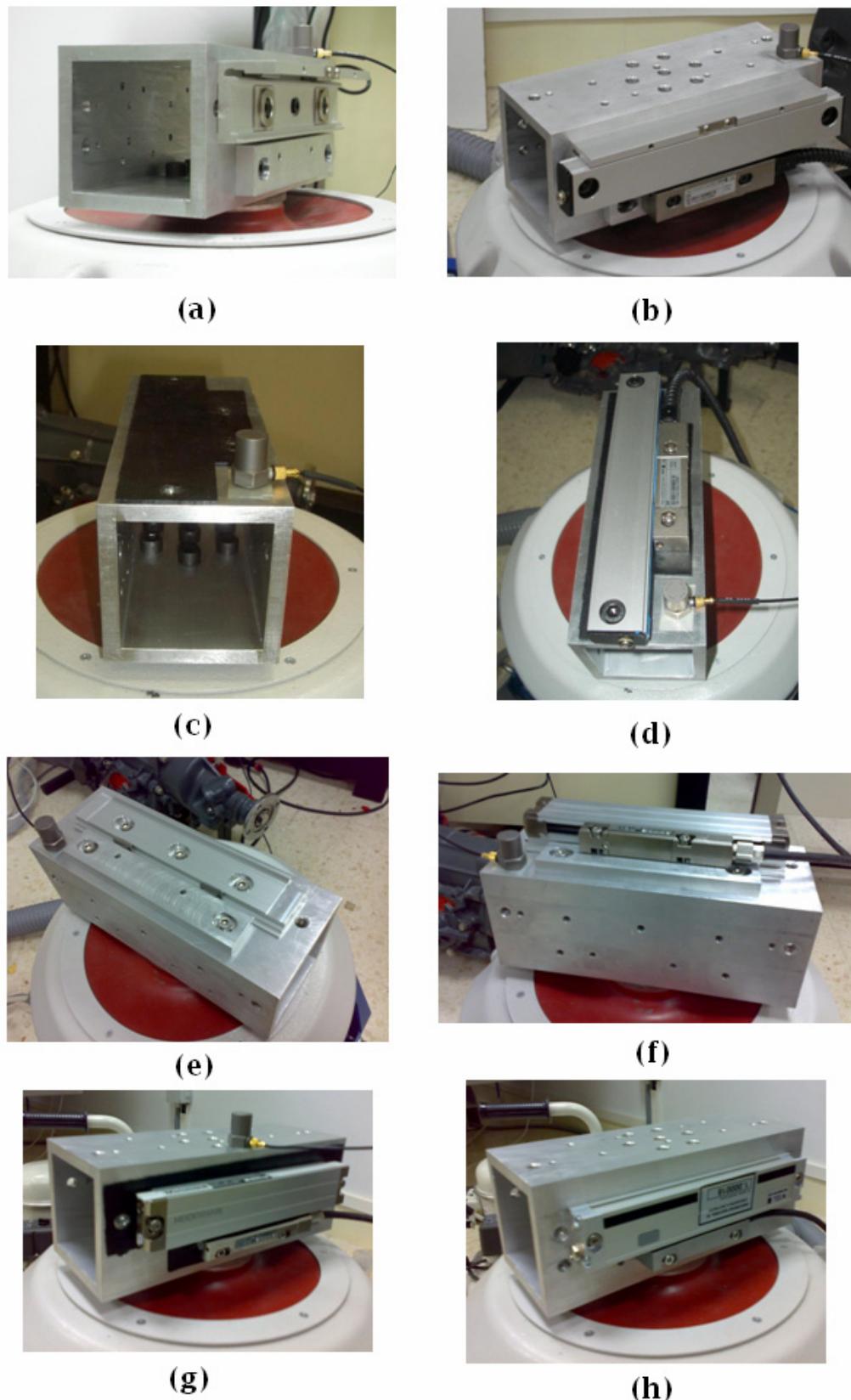


Fig. 3. Fotografías del montaje de los encoders mediante los diversos elementos de protección pasiva.

En las fotografías de la Fig. 3 se muestra el proceso de montaje para los tres encoders ensayados en este estudio. En las fotografías 3(a), 3(b), 3(e) y 3(f) se puede ver el proceso de montaje de la regleta metálica en el caso del encoder transmisor multicampo en posición vertical 3(a), 3(b) y del transmisor de un solo campo en posición horizontal 3(e), 3(f). La regleta metálica se une al útil mediante unión atornillada. De la misma manera se une un calzo donde apoya la cabeza del encoder y al que se une la misma también mediante unión atornillada. Finalmente se arriostra el movimiento longitudinal de la regla mediante la presión que ejercen dos tornillos sobre una pestaña metálica diseñada para tal fin. En las fotografías 3(c) y 3(d) de la misma figura se muestra el proceso de montaje de la plancha de material elastomérico para el transmisor multicampo en posición horizontal. La plancha, de 1 mm de espesor, se dispone en el útil previa realización de las aberturas correspondientes al paso de los tornillos; posteriormente se fija el encoder sobre la superficie de la plancha. En la fotografía 3(g) se puede ver el encoder transmisor de un solo campo con el material elastomérico ya montado en posición vertical. Se han seleccionado dos tipos de material elastomérico atendiendo a distintos grados de amortiguamiento. De esta manera se ha seleccionado Cauchó Natural NR, que tiene una baja temperatura de transición vítreo. Esto se traduce en que presenta una alta transmisibilidad a la frecuencia de resonancia y una baja transmisibilidad para frecuencias superiores a la de resonancia. El efecto contrario se da en el otro material seleccionado, el Cauchó Nitrilo NBR, con altas propiedades de amortiguamiento. La última fotografía 3(h) de esta figura muestra el encoder reflexivo multicampo en posición vertical. En esta fotografía se puede apreciar la banda permanente de material elastomérico, dado que va en ambos lados del perfil. En la Fig. 4 se muestran las vistas de los montajes en detalle del encoder transmisor de un solo campo con la regleta metálica en posición horizontal y del transmisor multicampo con la plancha de material elastomérico en posición vertical.

4. RESULTADOS

Se han realizado un total de 20 experimentos: 8 para el encoder transmisor multicampo y 8 para el encoder transmisor de un solo campo (correspondiendo al encoder sin protección, encoder con protección mediante regleta metálica, protección mediante plancha de elastómero NR y protección mediante plancha de elastómero NBR; para las posiciones vertical y horizontal), y 4 experimentos para el encoder reflexivo multicampo (correspondiendo a amplitudes de vibración de 100 ms^{-2} y 200 ms^{-2} , para cada una de las posiciones comentadas en el anterior caso). Para cada experimento se han realizado 10 ensayos, resultando en un total de 200 ensayos a vibraciones para el estudio comparativo. La media y la incertidumbre asociada de los resultados obtenidos se muestran en las figuras de resultados.

En la Fig. 5 se muestran los resultados para el encoder transmisor multicampo en posición vertical. Se pueden apreciar dos resonancias importantes en torno a los 1200 Hz y a los 1500 Hz, con errores que doblan la precisión del encoder. Ambas resonancias se pueden observar también cuando se utiliza la regleta metálica (Fig. 5(b)). El uso de la regleta hace que se estreche el intervalo de frecuencias en el que se comete error para las frecuencias mencionadas y además reduce el valor del error cometido para la segunda resonancia hasta un valor por debajo de la precisión del instrumento. También se puede apreciar en esta figura un peor comportamiento del encoder en el rango de los 0-800 Hz que para el caso en el que encoder no utiliza ningún tipo de protección a vibraciones. La Fig. 5(c) claramente muestra que el caucho NR no es una opción a contemplar como elemento de protección para la posición vertical. La protección mediante NBR (Fig. 5(d)) reduce el error cometido para la resonancia de 1500 Hz pero introduce nuevos errores en el rango de los 700 Hz con valores que exceden la precisión.

La Fig. 6 muestra los resultados obtenidos para el encoder transmisor de un solo campo en posición vertical. Lo primero que llama la atención es que la introducción de cualquiera de los elementos de protección ensayados da lugar a un peor comportamiento del encoder. De hecho, el encoder sin protección tiene un rendimiento muy bueno en todo el rango de frecuencias analizado. La regleta metálica suministrada por los fabricantes introduce dos nuevas resonancias, una entre los 600-1200 Hz y otra a los 1700 Hz (Fig. 6(b)). Para las planchas elastoméricas NR y NBR (Figuras 6(c) y 6(d)) se han obtenido comportamientos similares, existiendo valores de error por encima de la precisión para el caso en que se utiliza el caucho NR.

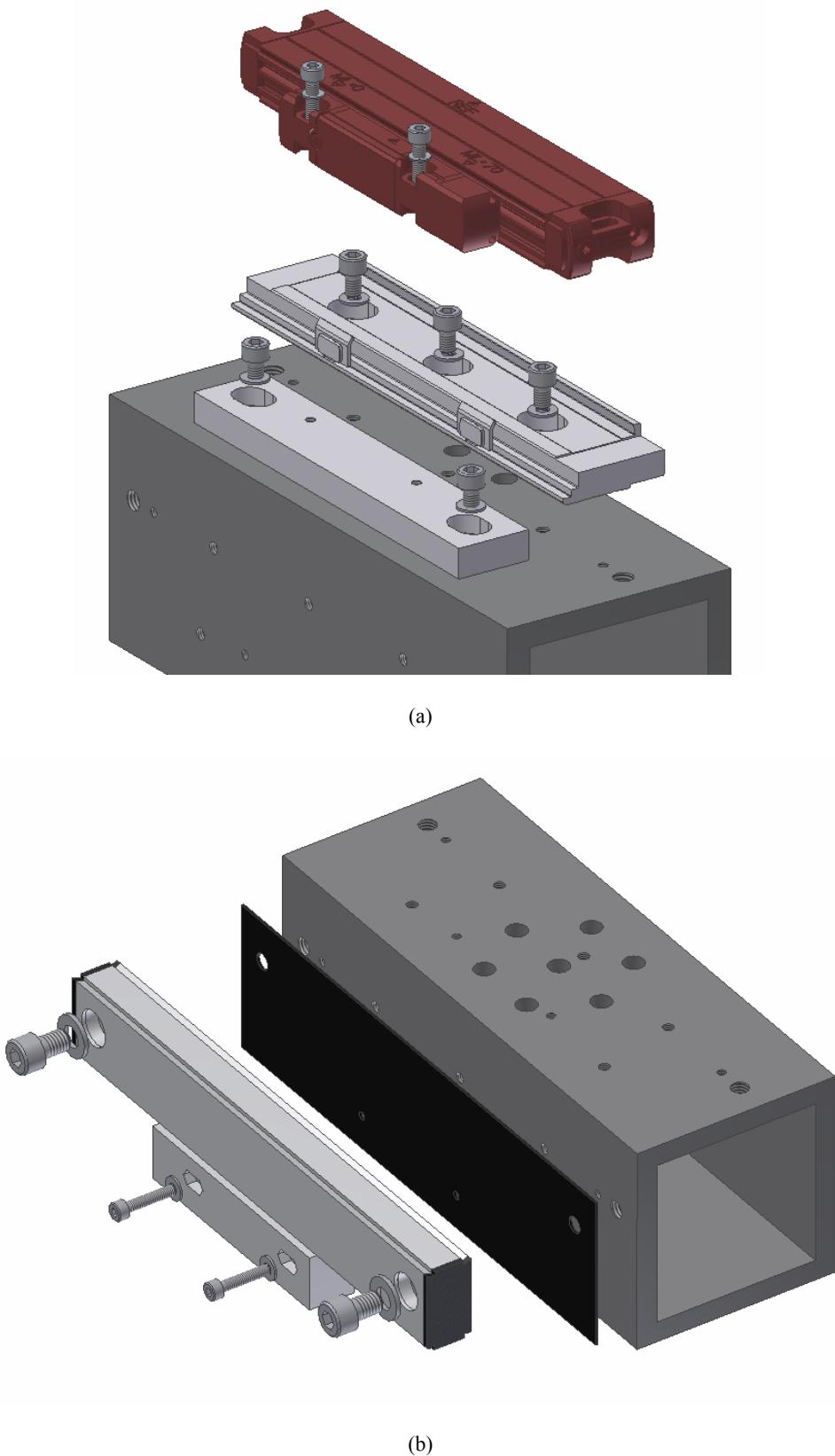


Fig. 4. a) Esquema de montaje de la regleta metálica para el encoder transmisivo de un solo campo en posición horizontal. b) Esquema de montaje de material elastomérico para el encoder transmisivo multicampo en posición vertical.

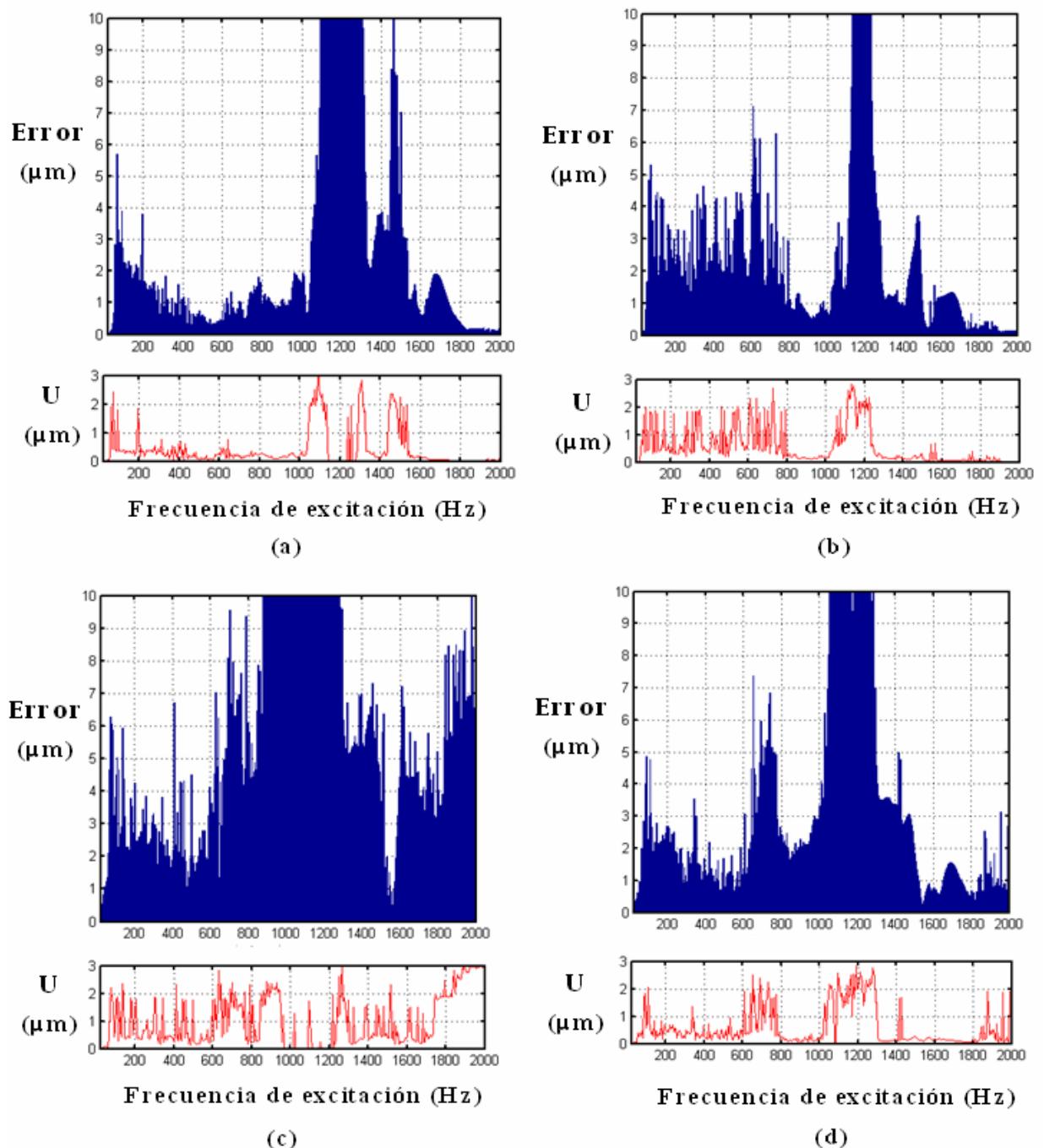


Fig. 5. Gráficas de precisión para el encoder transmisible multicampo en posición vertical; a) sin protección; b) con regleta metálica; c) con elastómero NR; d) con elastómero NBR.

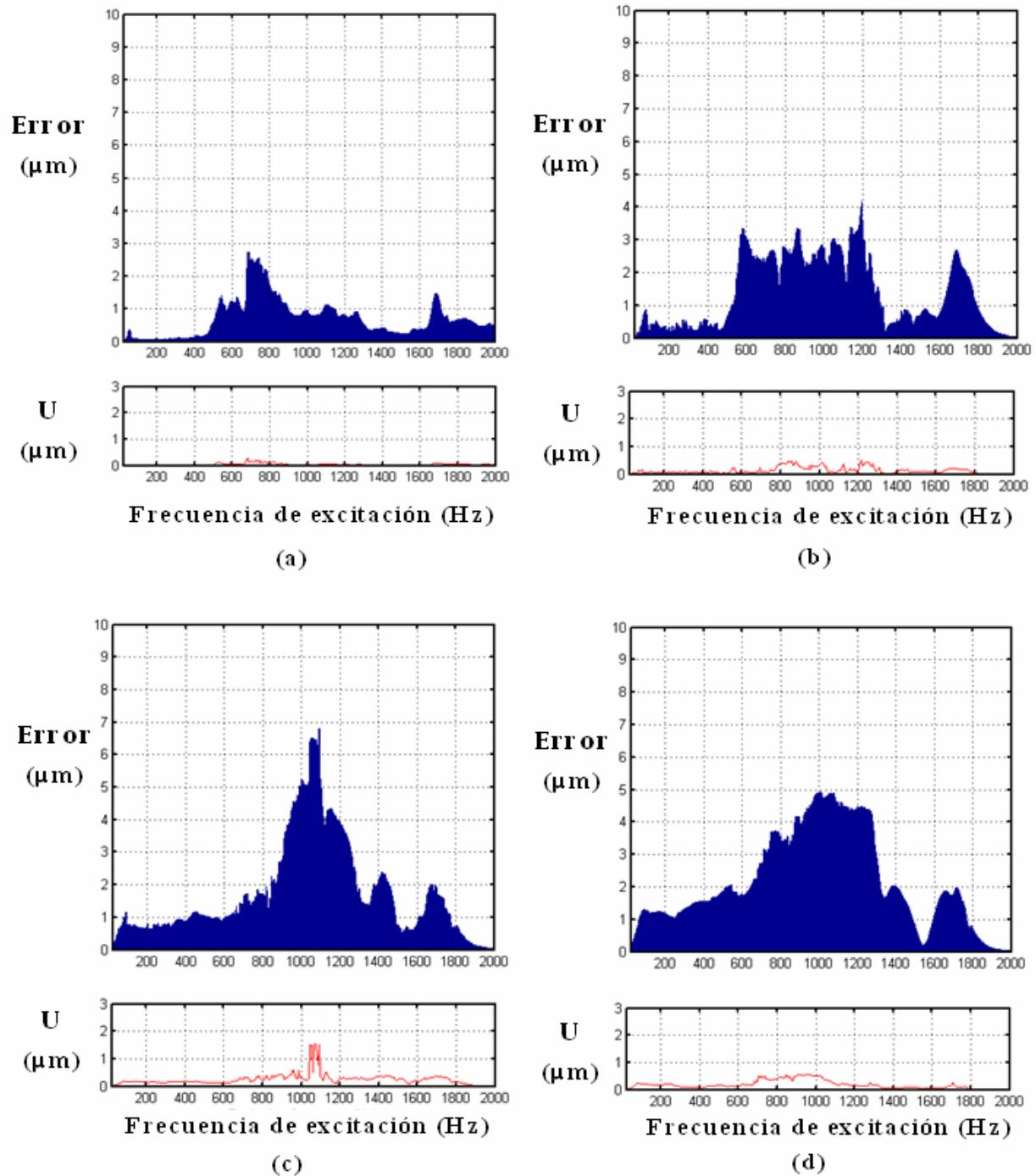


Fig. 6. Gráficas de precisión para el encoder transmisivo de un solo campo en posición vertical; a) sin protección; b) con regleta metálica; c) con elastómero NR; d) con elastómero NBR.

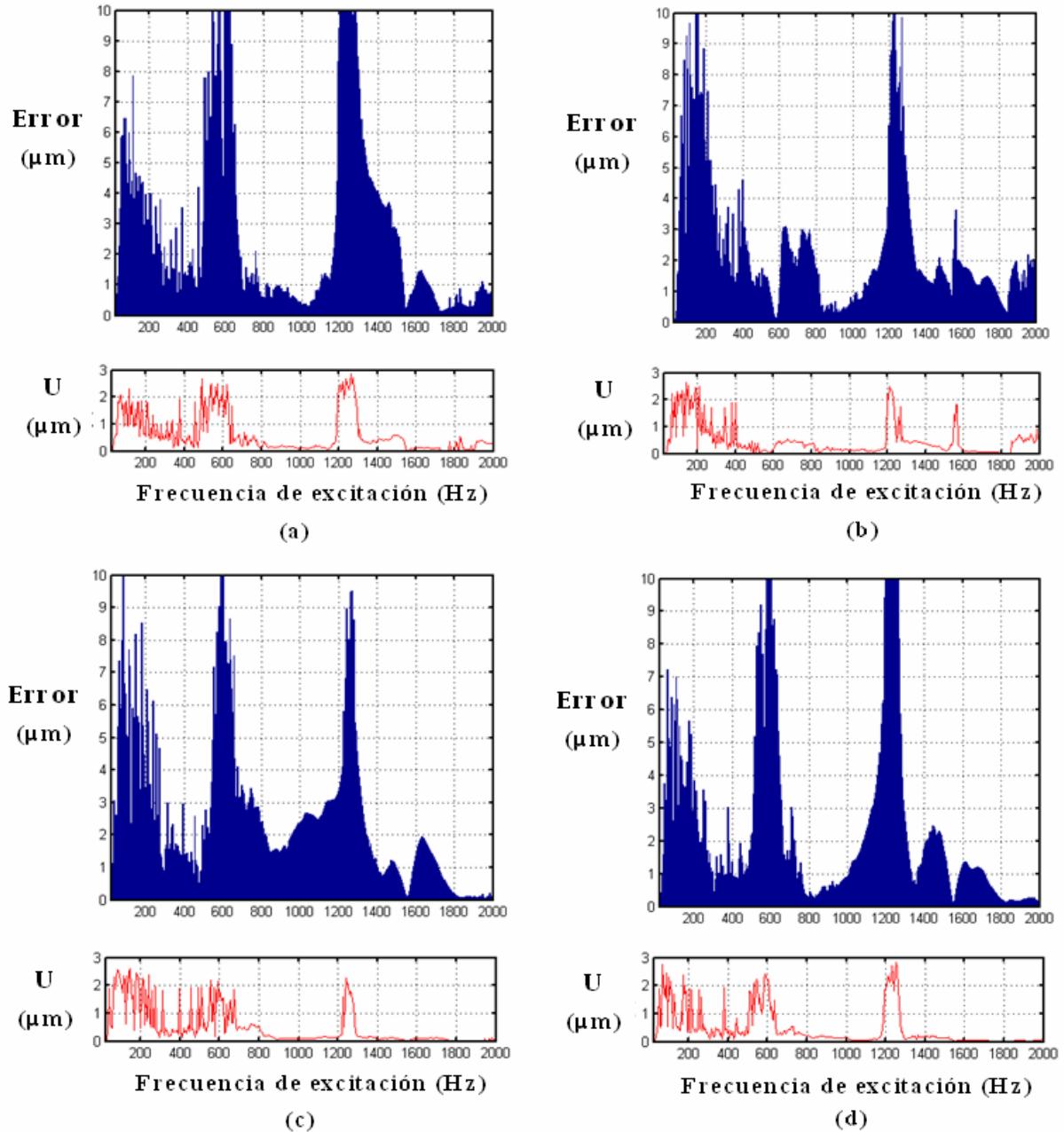


Fig. 7. Gráficas de precisión para el encoder transmisivo multicampo en posición horizontal. a) sin protección; b) con regleta metálica; c) con elastómero NR; d) con elastómero NBR.

En la Fig. 7 se muestran los resultados obtenidos para el encoder transmisivo multicampo para la posición horizontal. La utilización de la regleta metálica produce un comportamiento similar al ya analizado para la posición vertical: estrecha el intervalo de resonancia a 1200 Hz (Fig. 7(b)) y reduce efectivamente el error para los 600 Hz. Un aspecto negativo de la utilización de este elemento de protección es que amplifica el error a muy bajas frecuencias. Los resultados obtenidos son similares para el caso de protección mediante los dos tipos de caucho ensayados, (Figuras 7(c) y 7(d)). Los dos tipos de caucho parecen mejorar el comportamiento del encoder únicamente para muy altas frecuencias, concretamente, por encima de los 1800 Hz.

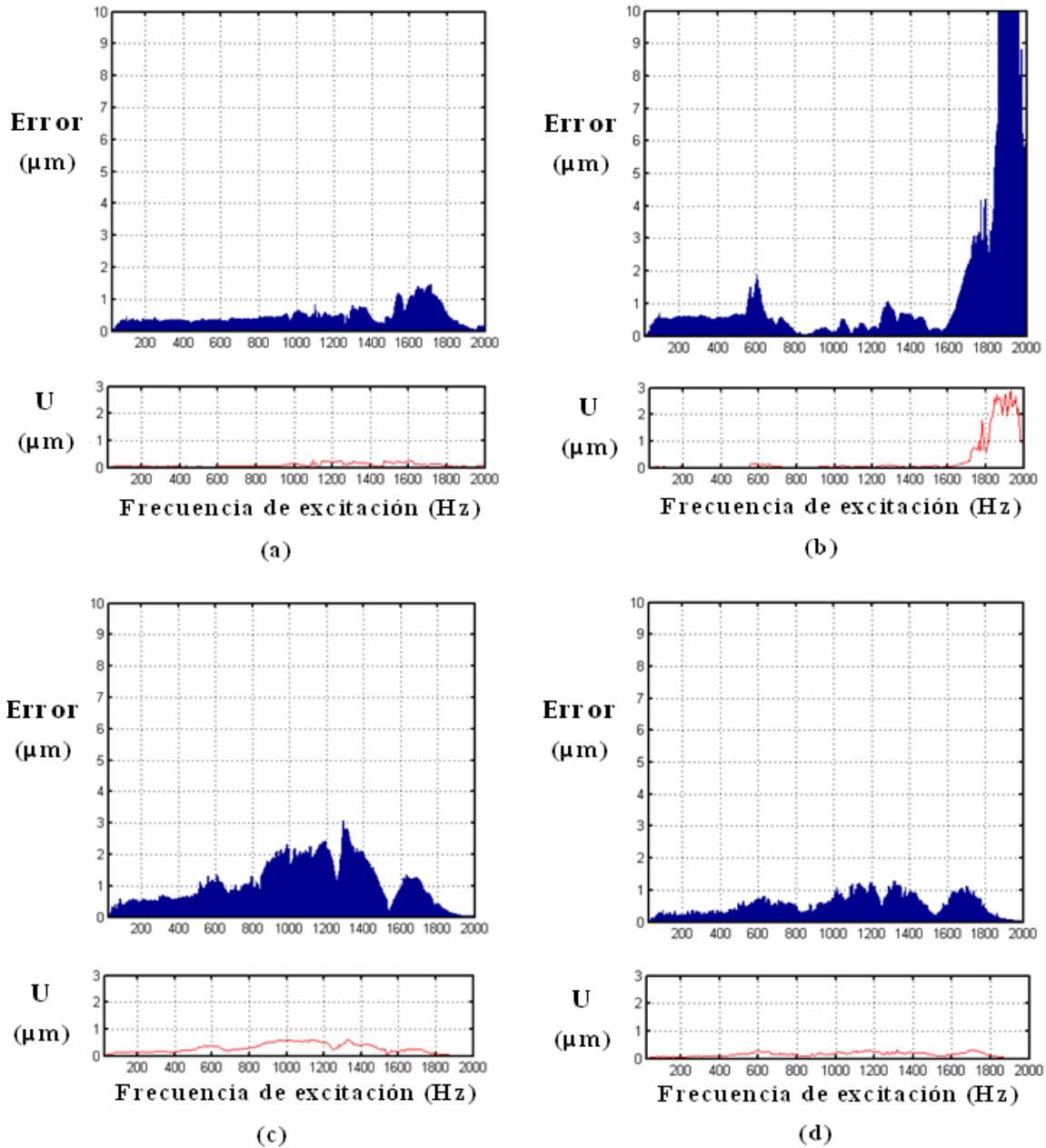


Fig. 8. Gráficas de precisión para el encoder transmisivo de un solo campo en posición horizontal; a) sin protección; b) con regleta metálica; c) con elastómero NR; d) con elastómero NBR.

En la Fig. 8 se muestran los resultados para el encoder de un solo campo en posición horizontal. De nuevo, este encoder presenta un comportamiento excelente en todo el rango de frecuencias analizado (Fig. 8(a)). El comportamiento empeora significativamente en el caso de la utilización del elastómero NBR (Fig. 8(d)). El caucho NR (Fig. 8(c)) introduce cierta amplificación en los valores de error obtenidos pero, en cualquier caso, los errores están por debajo de la precisión del instrumento. Al igual que ocurría en el caso de la posición vertical, la utilización de la regleta metálica introduce nuevas resonancias, en el rango de muy altas frecuencias para este caso. Los valores del error para esta resonancia exceden claramente dos veces la precisión del encoder, siendo el único caso en el que el encoder transmisivo de un solo campo comete un error por encima de la precisión.

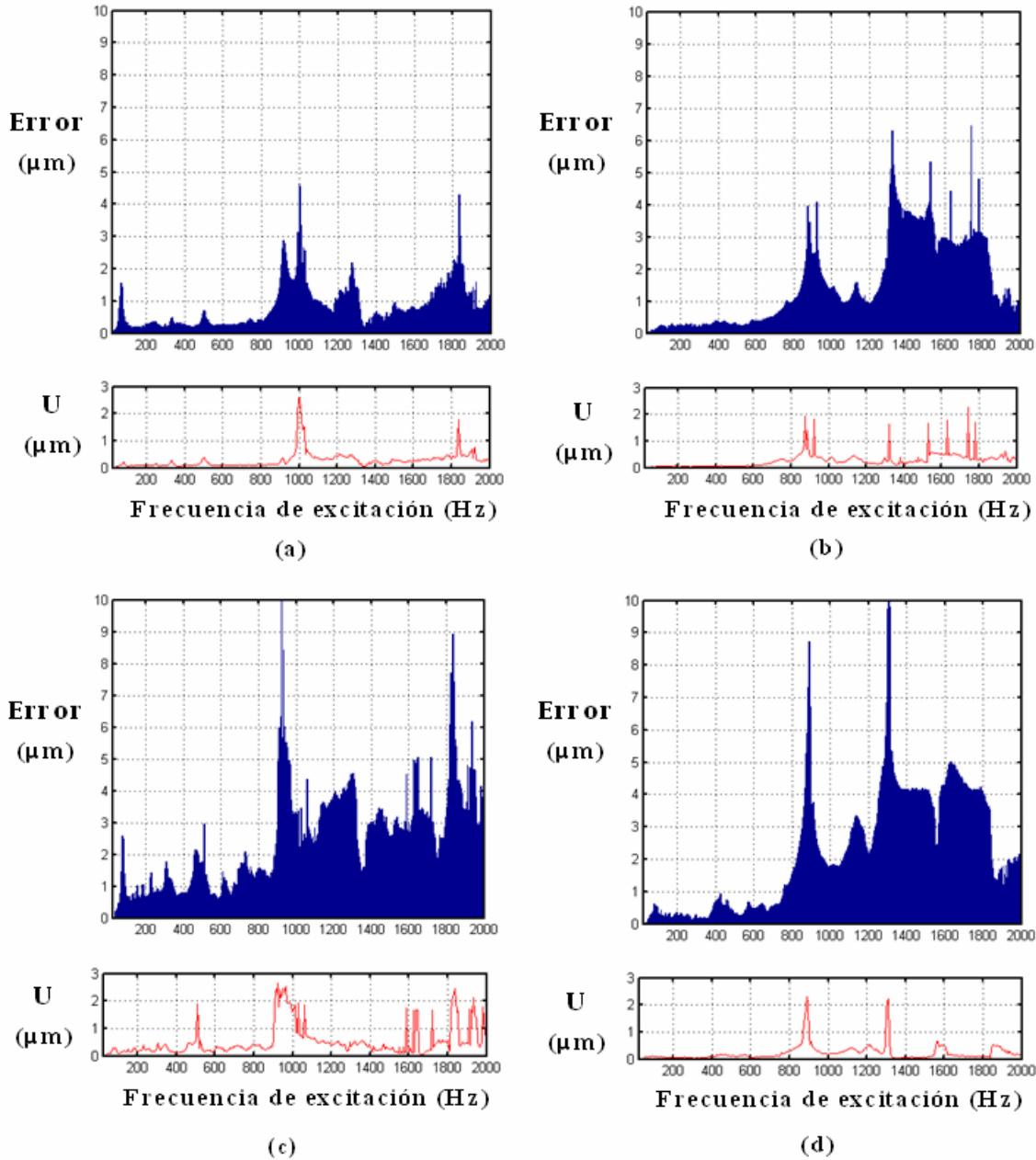


Fig. 9. Gráficas de precisión para el encoder reflexivo multicampo; a) posición vertical a 100 ms^{-2} de amplitud de aceleración; b) posición horizontal a 100 ms^{-2} de amplitud de aceleración; c) posición vertical a 200 ms^{-2} de amplitud de aceleración; d) posición horizontal a 200 ms^{-2} de amplitud de aceleración.

En las Figuras 9(a) y 9(c) se muestran los resultados para el encoder reflexivo multicampo ensayado en posición vertical. La utilización de la banda elastomérica puede ser un método efectivo de protección a vibraciones para amplitudes de la aceleración por debajo de 100 ms^{-2} (Fig. 9(a)) aunque los errores sean cercanos a la precisión del encoder; sin embargo, no asegura un adecuado comportamiento cuando las amplitudes alcanzan valores de 200 ms^{-2} , tal y como se puede apreciar en la Fig. 9(c), especialmente para el rango de frecuencias medio-alto, donde los valores del error pueden doblar la precisión de este encoder. En las Figuras 9(b) y 9(d) se muestran los resultados obtenidos para el encoder reflexivo multicampo en posición horizontal. Las gráficas de error para 100 ms^{-2} (Fig. 9(b)) y 200 ms^{-2} (Fig. 9(d)) guardan cierta similitud en la forma diferenciándose en los valores máximos de los picos de error. Independientemente

de la posición, el peor comportamiento de este encoder se produce para el rango de frecuencias medio-alto.

5. CONCLUSIONES

En este artículo se ha analizado el comportamiento a vibraciones de encoders ópticos lineales transmisivos y reflexivos, multicampo y de un solo campo, cuando se utilizan materiales metálicos y elastoméricos como elementos de protección pasiva. Los errores cometidos por estos sensores cuando se superan los valores de aceleración a partir de los que se recomienda utilizar los elementos protección pueden llegar a ser varias veces superiores a la precisión del instrumento. Valores del error por encima de la precisión del encoder se dan también en el caso de utilizar el elemento de protección a vibraciones suministrado por los fabricantes, como es la regleta metálica. Para el encoder transmisible de un solo campo, el comportamiento es incluso mejor en el caso en que no se utiliza ningún elemento de protección a vibraciones, ya que la regleta puede introducir nuevas resonancias para valores muy altos de la frecuencia de excitación cuando el encoder se posiciona horizontalmente con respecto a la dirección de la vibración. Para el caso del encoder transmisible multicampo la utilización de la regleta metálica reduce los valores del error para valores de frecuencias muy localizadas pero tampoco asegura un rendimiento adecuado en todo el rango de frecuencias en el que se ha trabajado, pudiendo empeorar el comportamiento para muy bajas frecuencias.

La utilización de planchas elastoméricas NR y NBR de un milímetro de espesor no supone ninguna mejora en el comportamiento del encoder en tanto que la precisión del encoder se ve más influenciada por el hecho de no poder asegurar un cumplimiento estricto de los requisitos de montaje al utilizar estos materiales como elementos de protección a vibraciones. En cualquier caso, la utilización de estos materiales puede amplificar el error cometido por el encoder para determinados intervalos de frecuencia, especialmente en caso de utilizar el material elastomérico NR. Solamente parece haber cierta atenuación de las vibraciones con estos materiales para valores muy altos de frecuencias cuando se dispone el encoder en posición perpendicular a la dirección de vibración.

REFERENCIAS

- [1] Alejandre, I., Artes, M., "Machine Tool Errors Caused by Optical Linear Encoders", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, **218**(1), 113-122 (2004)
- [2] Ernst, A., "Vibration resistant measuring device", United States Patent 4169316, Oct. 2 (1979)
- [3] Affa, A., "Low vibration fastening of a scale to a carrier of a position measuring arrangement", United States Patent 5611148, Mar. 18 (1997)
- [4] Welker, H., "Measuring scale casing and mounting spar", United States Patent 4586760, May 6 (1986)
- [5] Alejandre, I., Artés, M., "Method for the evaluation of optical encoders performance under vibration", *Precision Engineering*, **31**, 114–121 (2007)
- [6] EN 60068-2-6 Environmental testing. Part 2: Tests. Tests Fc: Vibration (Sinusoidal). July (1996)

COMPARATIVE STUDY OF THE BEHAVIOR OF OPTICAL LINEAR ENCODERS UNDER VIBRATIONS USING PASSIVE PROTECTION ELEMENTS

Abstract – In this article a comparative study between transmissive and reflexive, multi-field and single-field optical linear encoders is done when metallic and elastomeric materials are used as passive vibration protection elements. The interest of the study lies in the fact that the accuracy of these displacement sensors is strongly conditioned by vibrations. Actually, manufacturers recommend the use of protection elements attached to the encoder when the acceleration amplitude exceeds certain value. The methodology used is based on the analysis of the encoder over a frequency range obtaining an accuracy chart that allows comparing the encoder's behaviour in different situations.

Keywords – Optical encoders, Passive protection, Vibration tests.