
ACONDICIONAMIENTO Y DIGITALIZACIÓN DE LA SEÑAL DE UN LVDT PARA LA MEDICIÓN DEL PERFIL DE UNA SUPERFICIE SÓLIDA

Acondicionamiento y Digitalización de un LVDT

CONDITIONING AND DIGITALIZATION OF A LVDT SIGNAL FOR SOLID SURFACE
PROFILE MEASUREMENTS
Conditioning and Digitalization of a LVDT

Jorge Mario Uribe Martínez¹, Leidy Johana Quintero Rodríguez²,
Liliana Tirado-Mejía,³ Francisco Javier Ibarquén⁴

¹. Ingeniero Electrónico, Universidad del Quindío

². Ingeniero Electrónico, Universidad del Quindío

³. Instituto Interdisciplinario de las Ciencias, Universidad del Quindío

⁴. Programa de Ingeniería Electrónica, Universidad del Quindío

Recibido: 16 de febrero de 2014

Aceptado: 20 de marzo de 2014

Correspondencia: Leidy Johana Quintero-Rodríguez, IIC-UQ Cra 15 calle 12N Armenia Q.; e-mail: ljquinteror@uqvirtual.edu.co

RESUMEN

El LVDT es el elemento más importante para la medición de los perfiles utilizando un perfilómetro de contacto y su función es convertir las variaciones de desplazamiento de una aguja en variaciones de voltaje, a través del desplazamiento del núcleo de una bobina acoplado a la aguja. El desplazamiento del núcleo a escala completa se determinó midiendo el recorrido total que hace la aguja, obteniendo el mismo voltaje en el secundario para los desplazamientos extremos. Con este valor y con el de los voltajes del primario y secundario se encontró una alta sensibilidad para el LVDT del perfilómetro, siendo 7,19mV/V/mil el valor obtenido, lo que significa un reto para su lectura. Para el acondicionamiento del LVDT se utilizó un circuito AD698 que genera una señal oscilante, con amplitud y frecuencia ajustable para el primario, y un demodulador síncrono que convierte la señal del secundario en una señal DC, que incrementa linealmente con respecto a la posición del núcleo. Se diseñó e implementó un sistema de conversión A/D, teniendo en cuenta la resolución, la señal de entrada, la frecuencia de muestreo, las prestaciones estáticas y las dinámicas, la interfaz de comunicación, y el tamaño y el precio. La transmisión de los datos de la medida del perfil se realizó por medio del protocolo USB, a través de un microcontrolador ATxmega. Se realizaron medidas del perfil utilizando unas muestras patrón de 50, 5 y 1 KÅ, para evaluar el desempeño del sistema de acondicionamiento, obteniéndose resultados satisfactorios.

Palabras clave: perfilómetro, sensor LVDT, acondicionamiento de señal de bajo ruido, acondicionamiento de señal de dispositivo de alta sensibilidad.

ABSTRACT

The LVDT is the main element in profile measurements using a contact profiler. Its function is to convert the stylus displacement on a voltage response changing the position of the coil core. Due to the high sensitivity of this device, 7,19mC/V/mil, it is a challenge to measure its response. The sensitivity was calculated using the primary and secondary voltage and the core displacement at full scale. This value was obtained determining the two ends of the core's path in which the measured voltages are equal and between them the response is linear. For the LVDT conditioning we used an AD698 circuit which generates a harmonic signal with adjustable amplitude and frequency to the primary coil, and a synchronous demodulator which changes the signal of the secondary coil to a DC signal. This response increases linearly with the core position. According to the resolution, input signal, sampling time, dynamic and static benefits, communication interface and, size and price, the conversion A/D system was designed and implemented. The profile data were transmitted using USB protocol by an ATxmega microcontroller. To evaluate the performance of the conditioning system we used control patterns of 50, 5 and 1 KÅ obtaining good results.

Keywords: profiler, LVDT sensor, low noise signal conditioning, conditioning of a high sensitivity device.

INTRODUCCIÓN

La medición de las variaciones en las superficies sólidas de películas de recubrimientos duros, capas semiconductoras, capas metálicas para contactos eléctricos, entre otras, suministra información sobre procesos de fabricación y deposición, defectos que se forman en la superficie, espesores de las capas, propiedades relacionadas con la fragilidad de los recubrimientos, y por lo tanto, en el estudio de nuevos materiales y nuevas técnicas de fabricación, estas mediciones son de primordial importancia. Los perfilómetros son equipos que se utilizan para medir topografías de capas sólidas, detectando características de las superficies [].

El principio de funcionamiento para la medición de un perfil se basa en la detección del desplazamiento vertical de una aguja por efecto de las irregularidades de la superficie de la muestra []. El sensor encargado de convertir los pequeños desplazamientos debidos a los desniveles de una muestra en señales de voltaje, es el LVDT (linear variable differentia ltransformer), el cual es el elemento más importante para la medición del perfil. Se encuentra ubicado en la torre, encima de la aguja, conformada por una bobina primaria, dos bobinas secundarias y un núcleo de ferrita que se encuentra apoyado en la base que sujeta la aguja. En este trabajo la señal de salida del sensor ha sido tratada a través de una serie de etapas: etapa de acondicionamiento de la señal del sensor LVDT, etapa de acople de impedancias, etapa de filtrado de la señal, etapa de amplificación, etapa de conversión analógica a digital y por último, la etapa de transmisión de datos al computador para visualizar la medida de perfil de una superficie en una interfaz gráfica. Estas etapas

requieren especial tratamiento debido a la resolución y al rango de medida del perfilómetro, requiriendo importante para la etapa de acondicionamiento y adquisición de la señal. El acondicionamiento de la señal del sensor LVDT se realizó utilizando el circuito integrado AD698 de la compañía AnalogDevice, configurando una serie de parámetros para generar una señal oscilante para el bobinado primario del sensor, y además, para convertir la señal de salida del bobinado secundario en un voltaje digital que incrementa linealmente con respecto a la posición del núcleo.

La función del LVDT es convertir las variaciones de desplazamientos en variaciones de voltaje, cuando el núcleo se desplaza hacia arriba o hacia abajo, debido al movimiento que realiza la aguja cuando detecta una variación de altura en la muestra. La caracterización inicial del sensor LVDT consistió en determinar las conexiones eléctricas, medir el voltaje del primario, el voltaje del secundario, la frecuencia de operación y del desplazamiento del núcleo a escala completa. Para realizar esta última, se midió el recorrido total que realiza la aguja cuando se desplaza hacia arriba y abajo, obteniendo el mismo voltaje en el secundario para los desplazamientos. Este trabajo se realizó en un perfilómetro "Veeco Dektak 8000", el cual permite realizar la medida del perfil a partir de un valor de fuerza programado y por medio de un sensor LVDT que detecta los cambios de altura de la muestra.

MATERIALES Y MÉTODOS

El problema a resolver en este trabajo es acondicionar y digitalizar la señal de un sensor LVDT de un perfilómetro "VeecoDektak 8000" para medir el perfil

de una muestra dada, al realizar el desplazamiento de una estación porta-muestra bajo la aguja. Se parte de un sistema mecánico tipo balancín para realizar las mediciones del perfil, como se presenta en la Figura 1. En un extremo del balancín se encuentra la aguja y un cilindro de material magnético que sirve como núcleo del sensor LVDT, y en el extremo opuesto de la aguja hay un cilindro magnético que es el núcleo de una bobina (Force Coil) que realiza el contrapeso de la aguja y sirve también para ejercer una fuerza en la muestra, la cual es proporcional al voltaje suministrado a la bobina.

El diseño para la adquisición de la medida del LVDT, y por consiguiente la medición de los perfiles en superficies, se realizó siguiendo una metodología de diseño en donde se implementaron cada una de las etapas establecidas en el análisis de caja negra y en el análisis funcional por medio de la caja transparente.



Figura 1. Sistema mecánico tipo balancín para sostener la aguja en el perfilómetro.

En la Figura 2 se presentan las etapas de la implementación, en donde se inició con el acondicionamiento de la señal del sensor LVDT, la amplificación de la señal de salida, el acople de impedancias requerido de acuerdo a las características del convertidor analógico a digital, y por último, el proceso de conversión analógico a digital de la medida del perfil, para ser procesado y enviado al computador para visualizar la medida en una interfaz gráfica de usuario. Es importante resaltar que el sistema (perfilómetro con el LVDT y el sistema mecánico acoplado) estaba ya montado pero no estaba en funcionamiento. Es así como para realizar este trabajo fue necesario analizar y determinar las condiciones requeridas por el sistema antes de diseñar el acondicionamiento.

El diseño de las etapas de acondicionamiento, acople de impedancias y digitalización se realizó siguiendo unos métodos formales con base en el modelo para un proceso de diseño de Nigel Cross [], que se encuentra



estructurado a través de una serie de tareas, las cuales permiten realizar las tres etapas básicas del ciclo de diseño en ingeniería: el diseño conceptual, el diseño preliminar y el diseño de detalle. En este trabajo se utilizó el método formal del análisis funcional, estableciendo la función principal del sistema a través del análisis de caja negra y caja transparente.

El análisis de caja negra es una representación gráfica del sistema en proceso de diseño, en donde los datos de entrada se muestran precisamente entrando a la caja por el lado izquierdo, y los datos de salida por el lado derecho. Para el análisis de caja transparente se deben exponer las transformaciones de los datos de entrada en datos de salida; en este método se abre la caja negra hasta entender cómo se pueden transformar todos los datos de entrada en los datos de salida correspondientes y qué datos de entrada adicionales o efectos colaterales se producen por causa de las transformaciones [].

El acondicionamiento del sensor LVDT consiste en la implementación de una fuente de voltaje analógica para el bobinado primario y un circuito capaz de convertir la señal de salida del bobinado secundario en un voltaje digital, que incrementa linealmente con respecto a la posición del núcleo. Según las alternativas evaluadas en las etapas de diseño, la mejor opción para acondicionar la señal del sensor LVDT, consistió en utilizar el circuito integrado AD698, el cual genera una señal de salida en DC unipolar o bipolar con alto grado de precisión y repetibilidad. El circuito integrado tiene incluidas todas las funciones necesarias para acondicionar un sensor LVDT y con la adición de unos componentes pasivos, se logra ajusta la frecuencia de oscilación, la amplitud y la ganancia de la señal de salida []. Se siguió el procedimiento de diseño descrito según el fabricante del AD698, para la selección de los componentes [5]. En la Figura 3 se

presenta el circuito AD698, el cual puede generar una señal oscilante desde 20Hz a 20KHz, con amplitud de 1,2 Vrms a 24 Vrms para el bobinado primario del sensor. Tiene incluido un demodulador síncrono que convierte la señal del bobinado secundario en una señal DC, además incluye un amplificador que ajusta la ganancia para la señal de salida.

En la determinación de la sensibilidad del sensor, se aplicó un voltaje de 1,68 V en la bobina para que la aguja bajara hasta el límite inferior de su desplazamiento y en este punto se midió el voltaje en el secundario.

Luego de realizar esta medida, se cambió la polaridad del voltaje aplicado a la bobina para que el núcleo se desplazara hasta su límite superior y se realizó una variación de voltaje hasta obtener en la salida del circuito secundario, el mismo voltaje tanto para cuando se encuentra en el límite inferior como en el límite superior. En la Figura 4 y 5 se presentan las dos situaciones extremas; en la primera, la aguja está en el límite inferior, y se obtiene 764 mVrms en el primario y para el secundario 275 mVrms, y para la segunda gráfica este valor se mantiene al invertir la polaridad.

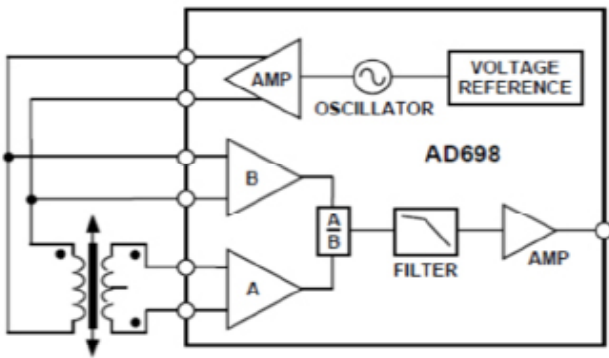


Figura 3. Diagrama de bloques del circuito integrado AD698 (datasheet) [5].

El desplazamiento que realiza la aguja desde el límite superior hasta el límite inferior, es el recorrido total del núcleo, el cual está dado por x y el desplazamiento del núcleo a escala completa d , es igual al recorrido total dividido dos, como se puede observar en la ec (1).

$$d = \pm \frac{x}{2} , \quad (1)$$

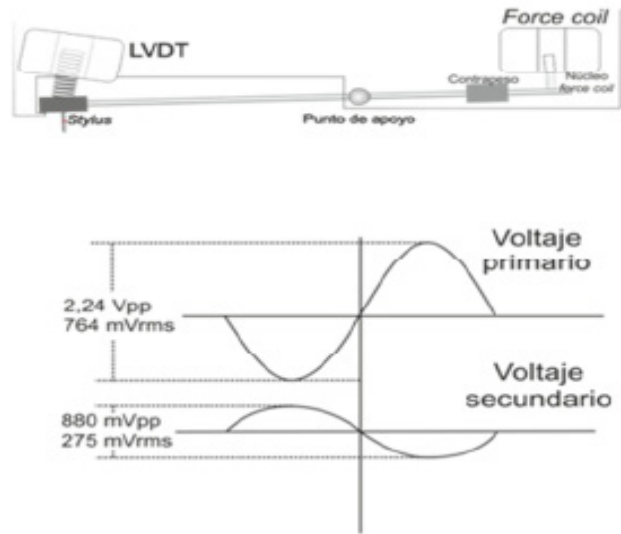


Figura 4. Desplazamiento de la aguja hasta el tope inferior y medida del voltaje en el primario y secundario del LVDT

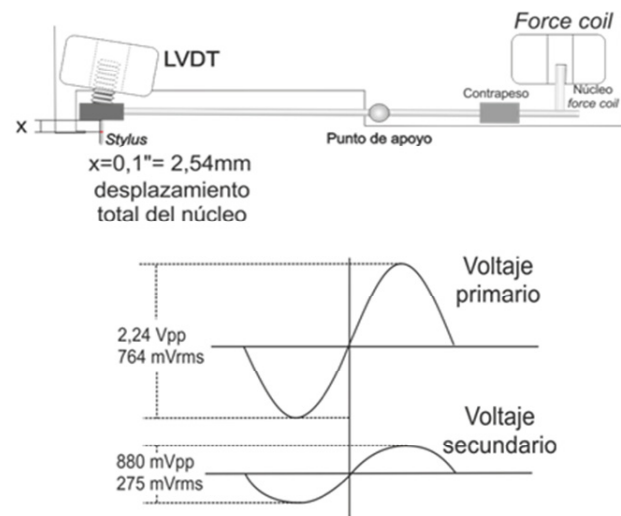


Figura 5. Desplazamiento del núcleo a escala completa

De acuerdo a los valores obtenidos anteriormente, se determinó que el desplazamiento del núcleo a escala completa es de $\pm 0,05''$ o 50 mil. A partir del desplazamiento a escala completa, del valor del voltaje en el primario (V_P) y del secundario (V_S), se encontró el valor de la sensibilidad (S) para el sensor LVDT, de acuerdo a lo descrito en la ec(2).

$$S = \frac{V_S}{V_P * d} \quad (2)$$

Se encontró que el valor de la sensibilidad para el LVDT del perfilómetro es de 7,19 mV/V/mil de acuerdo a las mediciones experimentales y cálculos descritos anteriormente.

Para la conexión entre el AD698 y el sensor LVDT, se utilizó un circuito en configuración serie oposición y con un voltaje de alimentación dual, como se presenta en la Figura 6. La selección de los componentes para este circuito se estableció con base en los valores de la frecuencia de operación del LVDT, amplitud de la señal de entrada, ancho de banda y el voltaje de salida a escala completa.

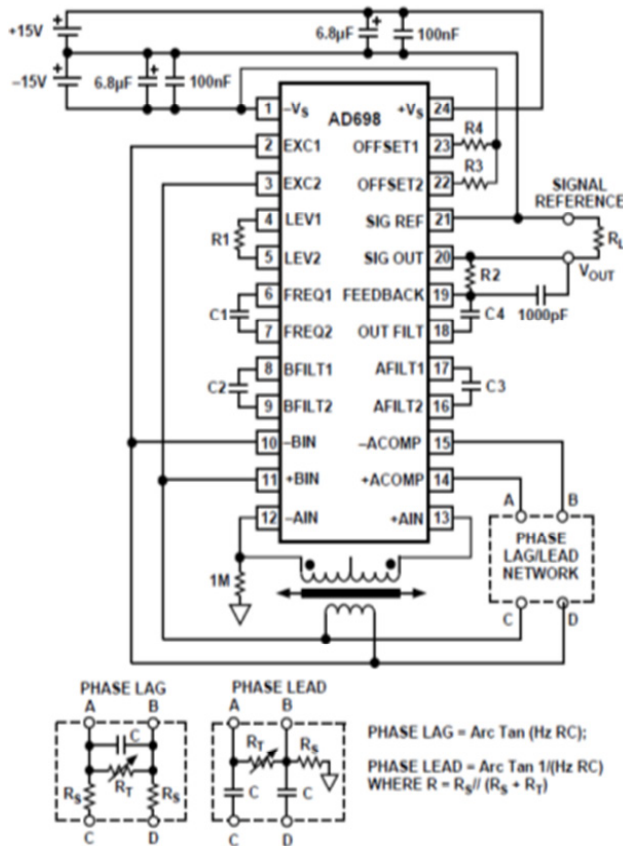


Figura 6. Conexión para un LVDT en configuración serie oposición y alimentación dual (datasheet) [5].

Del análisis de las características del LVDT y de su acople al sistema mecánico se encontró que la frecuencia de funcionamiento requerida por el primario del LVDT es de 5 KHz y el valor de la amplitud se estableció en un rango aproximado de 1 Vrms a 3,5 Vrms -valores seleccionados que buscan optimizar la linealidad y minimizar el ruido- dando como resultado en el secundario un rango de 0,25 Vrms a 3,5 Vrms. Estos valores corresponden a cuando el núcleo se encuentra en la posición de escala completa.

Para comprobar la amplitud del secundario, se utilizó la relación de transformación de voltaje (VTR, Voltage Transformation Ratio) de la ec(3), para el desplazamiento a escala completa (LMx, Maximum Stroke Length from null).

$$VTR = S \times LMx \quad (3)$$

Donde LMx está representado por una salida de voltaje DC, o sea, es la medida de voltaje máximo para representar un perfil. Con el valor de la sensibilidad y con el valor del desplazamiento a escala completa de 10 mil (0,254 mm), se calculó un valor para el VTR de 0,0719.

Experimentalmente se determinó un voltaje en el primario de 1,17 Vrms, pero con el valor del VTR se obtiene un voltaje en el secundario de 0,084 Vrms, que está fuera del rango óptimo. Esta limitación obligó a aumentar el recorrido del núcleo para garantizar un voltaje en el secundario dentro del rango establecido para el AD698. Se incrementó el LMx a 50 mil (1,27 mm), obteniendo un nuevo valor para el VTR de 0,359 y así mismo un voltaje en el secundario de 0,42Vrms. Este valor de voltaje se encuentra dentro del rango de voltajes que establece el AD698, pero se compromete al máximo el valor en la medida de la altura de una superficie. Como el objetivo principal es medir desniveles muy pequeños, se estableció el valor del Maximum Stroke Length from Null en 10 mil e incrementar el voltaje en el bobinado primario a 3,5 Vrms, asumiendo el riesgo de un voltaje mayor a 1,17 Vrms. Con este valor se obtiene un nuevo voltaje para el secundario de 0,25 Vrms, el cual se encuentra dentro del rango de funcionamiento del AD698.

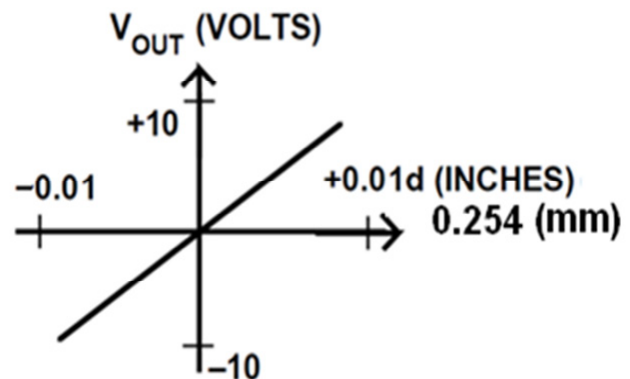


Figura 7. Salida de voltaje DC en función del desplazamiento del núcleo

El voltaje de salida para el AD698 se estableció en un rango de ± 10 V; cuando está en el máximo desplazamiento (0,254 mm) entrega 10 V y cuando está en el límite inferior del desplazamiento entre -10 V, como se ha representado en la Figura 7. Es así como la medida de las alturas en el perfil de una superficie sólida depende de la etapa de conversión analógica a digital. La propuesta de realizar una etapa de amplificación a esta señal de salida no es viable por la relación señal a ruido que presenta (voltaje ripple ~ 2.54 mV), siendo además ésta la máxima resolución.

La etapa siguiente es en donde se realiza el acople de impedancias, para pasar la señal de modo común (single-ended) a modo diferencial puesto que el conversor AD requiere una entrada diferencial con el fin de rechazar el ruido en modo común. Este circuito es el ADA4922, driver para manejar conversores A/D de 18 y 16 bits con un rango de entrada de ± 20 V.

Por último se realizó la etapa para la conversión analógica a digital, para visualizar las mediciones de los perfiles en una interfaz gráfica de usuario. Las características o parámetros que fueron tenidas en cuenta para seleccionar este circuito fueron la resolución, el tipo de la señal de entrada, la frecuencia de muestreo, la interfaz de comunicación, prestaciones estáticas y dinámicas, y el precio, siendo las dos primeras las determinantes en la selección del dispositivo. El circuito utilizado, AD7631, cuyas características son una señal de entrada bipolar diferencial, 18 bits, frecuencia de muestreo 250 KHz, interfaz SPI, entre otras, podría resolver diferencias de voltaje de $153 \mu\text{V}$ aproximadamente que equivalen a una medición de altura de 4 nm. Tan alta resolución no se obtuvo en este trabajo por la limitación del ruido en la salida del circuito de acondicionamiento.

Una vez digitalizada la señal se envía al PC mediante el protocolo de comunicación USB implementado en el microcontrolador ATxmega 256A3U. La visualización se realiza en el entorno de LabView.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para evaluar el desempeño del sistema en la medición de perfiles, se utilizó un conjunto de muestras patrón para pefilometría. Se realizó la medida de estos patrones en orden descendente, con el objetivo de analizar hasta dónde era capaz de medir la máquina.

Se inició el proceso de medición con la muestra más gruesa, de $50 \text{K}\text{\AA}$ ($5 \mu\text{m}$), con una fuerza de $\approx 3 \text{mgf}$ y se realizaron barridos en una única dirección. En la Figura 8 se observa una medida de perfil para una muestra patrón de $50 \text{K}\text{\AA}$ y una fuerza de $\approx 3 \text{mgf}$ moviéndose la base portamuestra a la izquierda. De este resultado vemos que, aunque el sistema si es capaz de detectar desniveles, no hay una fidelidad de forma del perfil. Este comportamiento se atribuye al bajo valor de fuerza que ejerce la aguja, lo que lleva a movimientos descontrolados de la aguja. Al aumentar la fuerza a 30 mgf, se obtiene el resultado presentado en la Figura 9, en donde se reproduce con mayor exactitud la estructura del patrón de calibración.

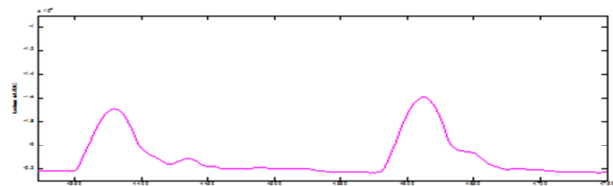


Figura 8. Patrón de $50 \text{K}\text{\AA}$ de espesor, con una fuerza de $\approx 3 \text{mgf}$ de la aguja. Se observan dos escalones que corresponden a las estructuras señaladas en la fotografía.

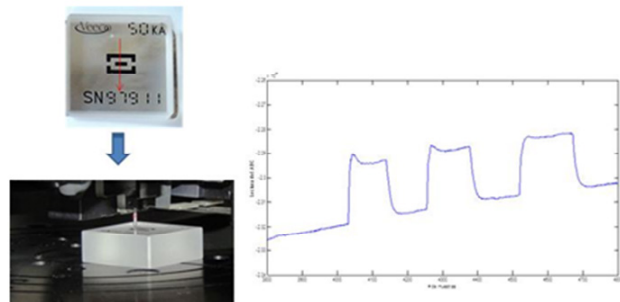


Figura 9. Patrón de $50 \text{K}\text{\AA}$ de espesor, con una fuerza de $\approx 30 \text{mgf}$ de la aguja. Se observan tres escalones que corresponden a las estructuras señaladas en la fotografía.

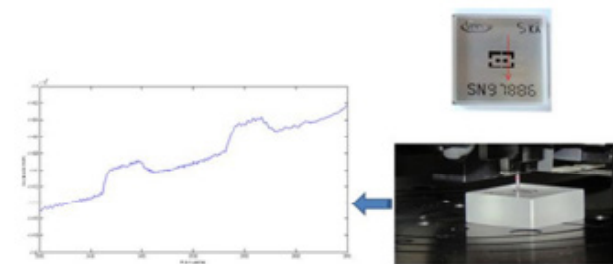


Figura 10. Patrón de $5 \text{K}\text{\AA}$ de espesor, con una fuerza de $\approx 30 \text{mgf}$ de la aguja. Se observan dos escalones que corresponden a las estructuras señaladas en la fotografía.

Una vez verificada la capacidad del sistema para leer alturas del orden de los micrómetros ($\sim 0.5 \mu\text{m}$) se realizaron mediciones con una muestra patrón de espesor $5\text{K}\text{\AA}$ ($0.5 \mu\text{m}$), y el resultado se presenta en la Figura 10, en donde se evidencia la disminución de la relación señal a ruido. La medición puede resolverse hasta un valor de 100 nm, siendo ésta la resolución lograda con la etapa de acondicionamiento, acople y digitalización de la señal del LVDT.

CONCLUSIONES

Se diseñaron y construyeron los circuitos impresos para el acondicionamiento, acople y digitalización, utilizando técnicas de diseño para eliminar el ruido ocasionado por el ruteado de las líneas, lazos cerrados de tierra y errores en el desacople de las líneas de alimentación.

Se implementó una etapa de acondicionamiento y de digitalización de la señal del LVDT para detectar los desniveles de las superficies, alcanzando un rango vertical para el desplazamiento del LVDT desde $1\text{K}\text{\AA}$ hasta $12700\text{K}\text{\AA}$, lo que permite resolver alturas hasta de 100 nm.

La limitante en la resolución alcanzada se debe al voltaje ripple generado por los circuitos osciladores del AD698.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Interdisciplinario de las Ciencias y a la Universidad del Quindío.

BIBLIOGRAFÍA

1. VeecoDektak. (2010). VeecoDektakProfiler. Consultado Diciembre 12, 2013, en <http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=111487&p=irol-newsArticle&ID=935791>.
2. Bruker. (2014). StylusProfilometry. Consultado Julio 25, 2013, en <http://www.bruker.com/products/surface-analysis/stylus-profilometry.html>.
3. Cross, N. (2008). Engineering Design Methods: Strategies for Product Design. London: LimusaWiley.
4. Clive, L y Little, P. (2002). El proceso de diseño en ingeniería: Como desarrollar soluciones efectivas. London: Limusa Wiley.
5. Analog Devices (2014). AD698: Universal LVDT Signal Conditioner. Consultado Enero 21, 2014, en <http://www.analog.com/en/other-products/lvdt-sensor-amplifiers/ad698/products/product.html>.