

Nuevo Software para Análisis de Datos de Rugosidad en 2D y 3D

Carlos Galván

Centro Nacional de Metrología
km 4,5 Carretera a Los Cués, 76246, Querétaro, México.
cgalvan@cenam.mx

RESUMEN

La medición del acabado superficial de piezas es de vital importancia para la industria metal-mecánica. En los últimos años, se ha estado trabajando en la definición de nuevas normas para caracterización de superficies en 3D. EL CENAM ha desarrollado un software para la estimación de algunos de los nuevos parámetros establecidos por la serie ISO/TS 16610, así como la generación de archivos en el nuevo formato para intercambio de datos establecido por la ISO 5436-2:2000. La versión propuesta hace uso de kernels separables para los filtros 3D con objeto de reducir la complejidad de los cálculos.

1. INTRODUCCIÓN

El parámetro de rugosidad es de vital importancia para piezas metal-mecánicas que están sujetas a fricción y/o desgaste de algún mecanismo. La verificación de superficies usando rugosímetros de 2 dimensiones ha sido empleada desde 1930 [11].

La rugosidad superficial es el conjunto de irregularidades de la superficie real, definidas convencionalmente en una sección donde los errores de forma y las ondulaciones han sido eliminados.

Hasta hace algunos años los parámetros de rugosidad habían sido definidos únicamente en dos dimensiones, se medía sobre una línea de la superficie y se estimaban los parámetros en base a los valores leídos por un rugosímetro.

Debido al incremento de las necesidades de tener piezas con tolerancias mas cerradas, en las reuniones recientes de los comités de normalización [2-3], en especial de ISO, se ha trabajado en la definición de nuevos parámetros de rugosidad, en especial aquellos que tienen que ver con la medición de rugosidad en tres dimensiones, tal es el caso de la serie ISO/TS-16610, en la cual aún se sigue trabajando en su definición y muchas de sus partes todavía se encuentran sometidas a revisión.

Ante esta tendencia el CENAM ha desarrollado un software que implementa algunos de los nuevos filtros propuesto por las normas y la estimación de los parámetros en tres dimensiones. Además el software permite la generación de datos en el formato especificado por la norma ISO 5436-2:2000, el cual permite el intercambio de datos entre los diferentes softwares.

Existen ya varios diseños de softwares que involucran estas nuevas tendencias. Entre estos trabajos se pueden contar los desarrollados por el Laboratorio primario de EUA (NIST) [5] y el de Reino Unido (NPL) [6], cuyas versiones incluso han sido colocadas en internet para uso general.

2. DISEÑO DEL SOFTWARE DE RUGOSIDAD

El diseño del software para estimación de parámetros de rugosidad que se describe en este trabajo esta basado en tres partes principales, La primera de ellas es la lectura de los datos, es decir la entrada de valores y al mismo tiempo la exportación de los resultados ya sea de los parámetros o de los datos filtrados.

Otra parte consiste en el filtrado de la señal, para eliminar los componentes de forma y ondulación, y dejar solo los componentes de rugosidad. Finalmente, el cálculo de los parámetros más comunes en rugosidad.

Cada uno de los elementos pueden ser aplicados a señales en 2D y 3D. Se considera a una señal en 2D aquella que se mide en una sola línea y se obtienen valores de desplazamiento, en tanto de 3D se habla cuando lo que se mide es una superficie (mallado) y se obtiene para cada punto un desplazamiento [4].

2.1. Entrada de Datos para Análisis

El software fue planteado para que pudiera tomar los datos generados por rugosímetros actuales y comerciales, entre ellos el de CENAM. De los formatos más comunes de los rugosímetros se encontró que el más usado es el del tipo "PRF" Un ejemplo de este formato se presenta en la Fig. 1.

```

1 2
SG2004 0.000000e+000 PRF
CX M 2.240100e+004 MM 1.000000e+000
D
CZ M 2.240100e+004 UM 1.000000e-006 L
EOR
STYLUS_RADIUS 0.000000e+000 MM
SPACING CX 2.500000e-004
MAP 1.000000e+000 CZ CZ
1.000000e+000 1.000000e+000
MAP 2.000000e+000 CZ CX
1.000000e+000 0.000000e+000
COMMENT CENAM-PRF
EOR
-1031440
-915403
-799366
.....
1431123
1315086
1250621
EOR
FOF

```

Fig. 1. Ejemplo del formato PRF para archivos de rugosidad en 2D.

Lo anterior le permite al programa tomar los datos generados por los rugosímetros comerciales, con el fin de analizar empleando los nuevos filtros y la estimación de los nuevos parámetros propuestos por ISO/TS 16610.

Con la intención de tomar en cuenta las nuevas tendencias de los archivos el software también puede leer archivos con formato "SMD" el cual está especificado en la norma ISO 5436-2:2000 y que se ha estado usando por las nuevas propuestas de software para intercambio de datos de rugosidad.

Este formato a diferencia del "PRF" es del tipo ASCII lo que permite que se pueda visualizar con algún editor de texto en una computadora. Un ejemplo del formato se presenta en la Fig. 2.

Cabe señalar que resulta más fácil su visualización sin herramientas especiales, pero también generan archivos más grandes, lo cual requiere más tiempo de procesamiento para su lectura.

Al mismo tiempo los datos leídos o procesados pueden ser exportados en cualquiera de estos formatos, permitiendo así, el intercambio con otros desarrollos.

```

ISO 5436 - 2000 EDM04meas
PRF 1 ISO5436
CX I 22401 mm 1.0e0 D 2.5e-4
CZ A 22401 um 1.0e0 D

DATE 25-Nov-2004
TIME 10:50
CREATED_BY Centro Nacional de Metrologia
PROFILE_FILTER Gaussian LS 0.0e0 LC 8.0e-
1
-0.296539
-0.270753
-0.244967
-0.219181
.....
-0.103144
-0.051572
-0.038679
30040

```

Fig. 2. Ejemplo del formato SMD para archivos de rugosidad en 2D.

Los formatos anteriores están especificados para datos de dos dimensiones. Como se comentó en líneas anteriores las nuevas normas establecen también los parámetros para mediciones en 3D, para esto la norma ISO 5436-2:2001 especifica el formato "SDF" para datos de superficie.

```

aNPL-V1.0
ManuFacID = CENAM
CreateDate = 210520051200
ModDate = 210520051200
NumPoints = 22401
NumProfiles = 1
Xscale = 2.5E-07
Yscale = 0
Zscale = 1E-06
Zresolution = -1
Compression = 0
DataType = 7
CheckType = 0
*
-0.296539
-0.270753
-0.244967
-0.219181

```

Fig. 3. Ejemplo del formato SDF para archivos de rugosidad en 3D.

El formato "SDF" es muy similar a su contraparte "SMD" solo que permite establecer las características para datos en tres dimensiones, como se observa en la Fig. 3. Este tipo de archivos también pueden ser leídos por el software desarrollado.

2.2. Filtrado de las Señales

La segunda sección del software lo constituye la aplicación de filtros a los datos leídos para la remoción de los elementos de forma y ondulación.

2.2.1. Filtros para señales en 2D

El software es capaz de aplicar filtros a las señales que se han obtenido, entre ellos el filtro 2CR, así como los filtros redefinidos y nuevos como el gaussiano y el spline cúbico.

El filtro 2CR ha sido usado desde los inicios del filtrado de señales, en este trabajo se implementó mediante la convolución de la señal origen y la señal obtenida mediante la Ec. (1):

$$s(x) = \frac{x A^2}{\lambda_c^r} e^{-\frac{x A}{\lambda_c}}, \tag{1}$$

donde: $A = \frac{2\pi}{\sqrt{3}}$ y λ_c es la longitud de corte.

Como se sabe, el filtro 2CR introduce un corrimiento de fase en el perfil filtrado, pero algunas especificaciones todavía lo contienen.

Al tratarse de señales digitales se hace uso de la definición de la convolución digital expresada en la Ec. (2), donde $p(k)$ es el perfil originalmente leído. La Ec. (2) es usada en señales 2D:

$$g(x) = \sum_{k=0}^{n-1} p(k)s(x - k). \tag{2}$$

De la misma manera haciendo uso de la convolución, se puede aplicar el filtro gaussiano el cual queda definido según la norma ISO 11562:1996 y cuya representación se extrae de la expresión de la Ec. (3).

$$s(x) = \frac{1}{\alpha \lambda_c} e^{-\pi \left(\frac{x}{a \lambda_c}\right)^2}, \tag{3}$$

donde: $a = \sqrt{\frac{\log 2}{\pi}} = 0,4697$.

Para la generación de las señales del kernel para la convolución es necesario obtener el espaciamiento de la señal original para con este valor generar los datos del kernel.

Como se puede observar la convolución es una tarea que requiere de mucho tiempo de procesamiento, pues por cada valor de salida hay que hacer $2n$ operaciones, donde n es el tamaño de la señal del kernel. Cuando se aplica en señales 3D se hace uso de una simplificación para no consumir demasiado tiempo en la operación.

El último filtro implementado a la fecha de este documento es el filtro de spline para señales 2D. Para este filtro también es necesario hacer uso de la convolución según la ISO/TS 16610-22:2006. El kernel esta dado por la función de la Ec. (4):

$$s(x) = \frac{\pi}{\lambda_c} \sin\left(\sqrt{2} \frac{\pi}{\lambda_c} |x| + \frac{\pi}{4}\right) e^{-\sqrt{2} \frac{\pi}{\lambda_c} |x|} \tag{4}$$

2.2.2 Filtros para Señales en 3D

La serie ISO/TS 16610 especifica igualmente el análisis de señales en 3 dimensiones. Los archivos de estos datos señalan el espaciamiento entre las líneas de la malla medida y al igual que en la de 2D solo contiene los datos de las coordenadas de altura.

Al igual que las señales en 2D la aplicación de la mayoría de los filtros lineales se hace mediante convolución, para lo que es necesario extrapolar la Ec. (2), hacia tres dimensiones como se observa en la Ec. (5):

$$g(x, y) = \sum_l^{m-1} \sum_{k=0}^{n-1} p(k, l) s(x - k, y - l) \tag{5}$$

La fórmula de la convolución 3D representa un incremento notable en la complejidad

computacional, por ello es importante buscar formas de reducir este tiempo.

El filtro que ha implementado actualmente al software es el gaussiano el cual es el mas usado tanto para señales en 2D como en 3D. El kernel del filtro es obtenido de la expresión dada en la Ec. (6):

$$s(x, y) = \frac{1}{\beta \lambda_{xc} \lambda_{yc}} e^{-\left\{ \frac{\pi}{\beta} \left[\left(\frac{x}{\lambda_{xc}} \right)^2 + \left(\frac{y}{\lambda_{yc}} \right)^2 \right] \right\}} \tag{6}$$

donde: λ_{xc} y λ_{yc} son las longitudes de corte para cada dimensión, en tanto que $\beta = \ln 2 / \pi$. Esta forma del filtro se encuentra en la norma ASME B46.1-2002.

Los valores de λ_{xc} y λ_{yc} , se han tomado similares a los software publicados.

2.2.3. Convolución Mediante el uso de Kerneles Separables

La opción por excelencia para el cálculo de la convolución es hacer uso de la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Este método tiene la limitante de tener que rellenar con ceros hasta obtener una señal con tamaño de potencia de 2, calcular la FFT para cada señal, multiplicar este resultado y determinar la inversa de FFT para obtener el resultado [1].

En el presente trabajo se exploraron otras formas de reducir el tiempo de cálculo y se hizo uso del concepto de kerneles separables.

Un kernel $s(x,y)$ es separable si se puede escribir como el producto de dos kerneles unidimensionales:

$$s(x, y) = s_1(x) s_2(y). \tag{7}$$

Con esta idea la convolución mediante este kernel puede escribirse como:

$$g(x, y) = \sum_l^{m-1} \left[\sum_{k=0}^{n-1} p(k, l) s_1(x - k) \right] s_2(y - l) \tag{8}$$

La implementación en lenguajes de programación se basa en realizar de manera alternada las convoluciones por renglones y por columnas.

Con esta propuesta se pudo reducir el tiempo de procesamiento de las señales de 3D. Para una señal de tamaño 256x256 el tiempo de procesamiento para el filtro Gaussiano es de 180 ms, y con el algoritmo directo se necesitan 1,3s. No se implementó el algoritmo de la FFT para realizar la comparación.

Una vez aplicado el filtro en cada una de sus modalidades hay que separar la señal filtrada de la original para obtener la señal para el cálculo de los parámetros. Dicha separación consiste en la resta de la señal filtrada a la señal original

2.3. Parámetros de Rugosidad que se Pueden Calcular

Los parámetros son calculados para las tres señales disponibles, es decir el perfil original, el de rugosidad y el de forma, donde se puede observar la variación de los mismos para cada tipo de señal.

Los parámetros están diferenciados por el prefijo de su descripción, donde P es para el perfil primario (original), R es para el de rugosidad y W es para el perfil de forma y ondulación (Waviness).

Para los parámetros en 2D la descripción está dada en ISO 4287:1997, es necesario hacer el cálculo de la línea de mínimos cuadrados del perfil para hacer los cálculos ya que es la que se toma de referencia. Para su estimación se hace uso del algoritmo tradicional de ajuste de línea de mínimos cuadrados.

Para señales de 2D los parámetros calculados son: Ra, Rq, Rsk, Rku, Rv, Rp y Rt de acuerdo a ISO 4287:1997.

Cuando se analizan señales 3D los parámetros estimados son: Sa, Sq, Sku, Sdq, Sdr, Sp, y Sv de acuerdo a ISO/TC 213 N057 2004 Draft. En este caso el prefijo de rugosidad cambia de R a S, para hacer la diferencia que el segundo se refiere a parámetros de una superficie.

3. CARÁCTERÍSTICAS DEL SOFTWARE

El software desarrollado en CENAM esta implementado en el lenguaje de programación C, usando el compilador de Lab/Windows CVI.

La programación esta basada en el paradigma de orientación a eventos y esta basado en una plataforma de Microsoft Windows XP.

Además de las características detalladas en la sección anterior, el software tiene una parte gráfica que permite la visualización de los datos y resultados de una manera más sencilla.

En el caso de los datos en 2D la visualización se puede hacer para las tres señales, una vez cargado el archivo de datos se visualizan los datos cargados y los parámetros relativos a estos datos.

Cuando se aplica alguno de los filtros programados se visualiza en la misma gráfica los datos filtrados y los originales, existe la opción dentro del programa de elegir ver solo el perfil de rugosidad. Los parámetros se pueden visualizar para tipo de señal. Véase la Fig. 4. Los parámetros de los filtros ya esta especificados en una lista que el usuario puede acceder dentro de las pantallas, tales como la longitud de corte, la cual se toma en relación al tamaño de la muestra. Los valores de la longitud de corte están en relación al tamaño de la muestra.

Como también se había mencionado, el software permite la exportación de los datos en los formatos especificados en norma ISO 5436-2:2000 para facilitar el intercambio de los mismos con otros softwares. Este intercambio se puede realizar con los software de publicados en internet por parte del Laboratorio Primario de Metrología en EUA (NIST) [5] y el laboratorio primario de Inglaterra (NPL) [6].

4. CÁLCULOS Y RESULTADOS

Una de las maneras mas directas de probar los cálculo de un software es verificarlo contra datos considerados como Estándares de Software de Medición (Softgauge es el término en inglés). Estos Softgauge son datos sintéticos para los cuales los valores de los parámetros son conocidos y que son publicados junto con sus datos.

Ambas herramientas publicadas en internet (NIST y NPL) publican sus bases de Softgauges para que los softwares puedan verificar la exactitud de sus cálculos.

El software desarrollado en CENAM ha sido probado con estas dos bases de datos y reporta una exactitud hasta las décimas de nm en valores de 2D y hasta las centenas de nm para datos en 3D, ambos en el peor de los casos. Lo cual asegura que

los cálculos están dentro del orden de exactitud requerido. Para los datos y valores que se pueden observar en la Fig. 5, los valores reportados por el software de NIST [5] son: $S_a=0,593\ 23\ \mu\text{m}$, $S_q=0,926\ 48\ \mu\text{m}$, $S_{ku}=11,762\ 49$, $S_{dq}=0,480\ 33\ \mu\text{m}/\mu\text{m}$, $S_t=13,774\ 64\ \mu\text{m}$

Se considera que las diferencias entre los cálculos para 2D se puede deber a la exactitud en la generación de los kernels de convolución o al algoritmo de la convolución dado que esta comparación se esta dando en dos algoritmos distintos para el cálculo de la convolución.

5. CONCLUSIONES

De los expuesto en las secciones anteriores se puede concluir que al momento CENAM cuenta con un nuevo software para estimar algunos de los nuevos filtros propuestos por la serie ISO/TS 16610. Se puede hacer el intercambio de datos con otros softwares que acepten los tipos de archivos mencionados en la norma ISO 5436-2:2000.

Con esta nueva aplicación se tienen las bases para seguir el desarrollo de los nuevos parámetros de rugosidad y poder en un futuro satisfacer la demanda de estas estimaciones por parte de los clientes.

REFERENCIAS

- [1] J. Raja and V. Radhakrishnan, Filtering of Surface Profiles Using Fast Fourier Transform, Int. of J. mach. Tool. Des. Res., Vol. 19, 133-141, 1979.
- [2] Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay), an American National Standard, ASME B46.1-2002, New York, NY.
- [3] ISO/TC 213 N057 2004 Draft ISO/WD Surface texture: Geometrical Product Specification (GPS) - Surface texture: Areal - Part 1: Terms, definitions and surface texture parameters (International Standard Organization)
- [4] K. J. Stout, P. J. Sullivan, *et al*, Three Dimensional Surface Topography, Second Edition, Penton Press.
- [5] <http://syseng.nist.gov/VSC/jsp/>, Abril 2008.
- [6] <http://161.112.232.32/softgauges/>, Abril 2008.
- [7] ISO 4287/1 Surface Roughness – Terminology – Part 1: Surface and its parameters, 1984
- [8] ISO 4287/2, Surface Roughness – Terminology – Part 2: Measurement of surface roughness parameters, 1984

[9] ISO 4287, Geometrical Product Specification (GPS) -- Surface texture: Profile method -- Terms, definitions and surface texture parameters, 2000.
 [10] ISO 3274, Geometrical Product Specifications (GPS) --Surface texture: Profile method-- Nominal characteristics of contact (stylus) instruments.

[11] D. J. Whitehouse, Handbook of Surface and Nanometrology, Institute of Physics Publishing, 2003.
 [12] ISO 11562, Geometrical Product Specifications (GPS) -- Surface texture: Profile method -- Metrological characteristics of phase correct filters, International Organization for Standardization, Geneva, 1996.

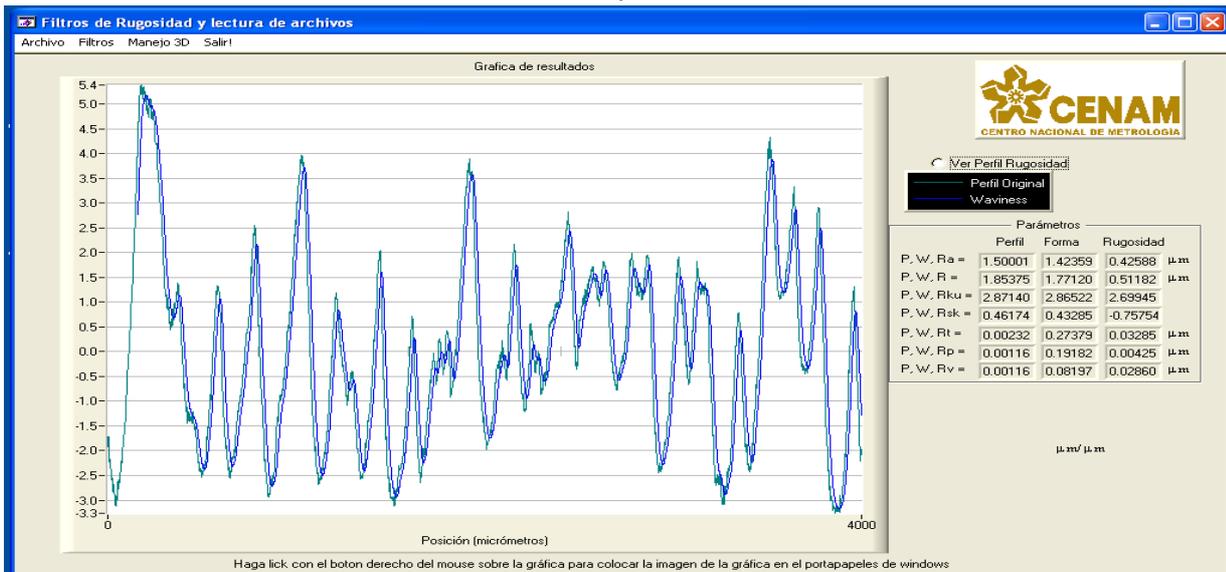


Fig. 4. Vista del software para señales de 2D.

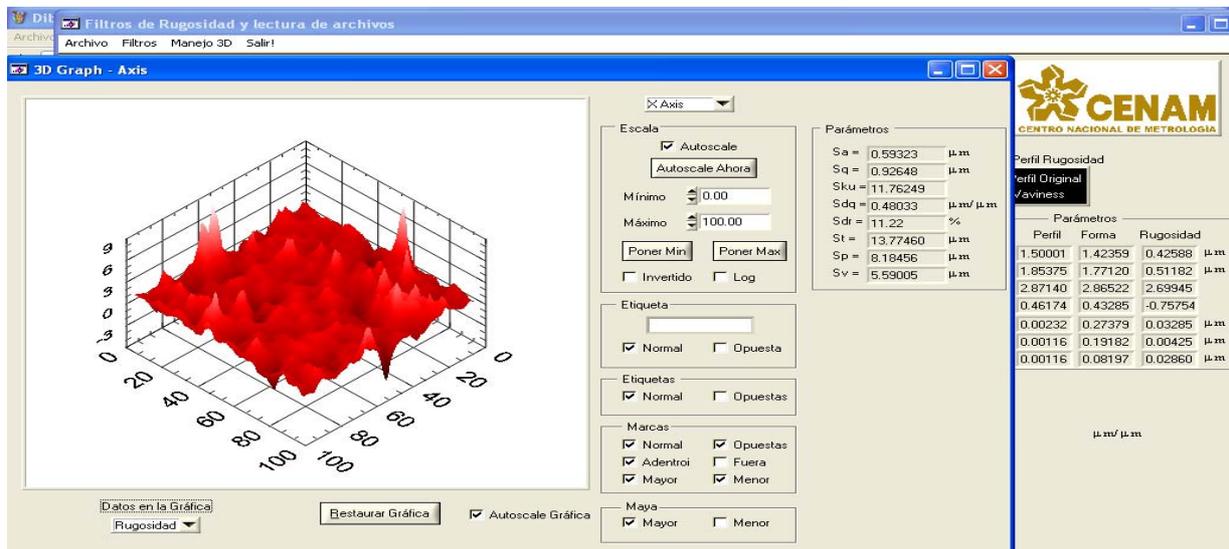


Fig. 5. Vista del software para señales de 3D.