

Análisis de Señales de Emisión Acústica en el Monitoreo del Desgaste de Herramientas.

CARLOS MARADEI ⁽¹⁾, ROSA PIOTRKOWSKI ⁽²⁾, JOSÉ E. RUZZANTE⁽³⁾

⁽¹⁾INSTITUTO DE TECNOLOGÍA “PROF. JORGE A. SÁBATO”, UNSAM-CNEA.

⁽²⁾ESCUELA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA, UNSAM.

⁽³⁾GRUPO ONDAS ELÁSTICAS, ENDE, CNEA.

BUENOS AIRES, ARGENTINA.

e-mail: ruzzante@cnea.gov.ar

Resumen

El fenómeno de emisión acústica (EA) puede ser empleado en el monitoreo de los procesos de mecanizado. La principal ventaja de la EA es que el rango de frecuencias de sus señales es mucho mayor que los de las vibraciones de las máquinas y los ruidos ambientales y no es intrusivo en las operaciones de corte. Además la EA está directamente relacionada con el estado de la herramienta, ya que es generada por la deformación plástica, rozamiento, fractura de virutas y propagación de fisuras. En el presente trabajo se han llevado a cabo mediciones de diversos parámetros de EA como amplitud, cuentas, rise time, eventos por segundo, cuentas por segundo a medida que se iba produciendo el desgaste del inserto. También se analizaron los espectros de frecuencia en las distintas etapas del desgaste. Si bien alguno de los parámetros antes mencionados son indicativos del desgaste, su uso en aplicaciones industriales es limitado ya que el establecimiento de un valor umbral para el control depende fuertemente de las variables del proceso.

The acoustic emission (AE) phenomenon can be employed in monitoring machining processes. The main advantage of AE is that the frequency range of its signals is much higher than that of machine vibrations and environmental noises, and that is not intrusive in cutting operations. Besides AE is directly related to the tool state since it is generated by plastic deformation, friction, chip fracture and crack propagation. In the present work several AE parameters measures, such as amplitude, counts, rise time, event rate, count rate, have been made as the insert was wearing. Frequency spectra have also been analyzed in different stages of wear. Even though some of the parameters mentioned above are indicative of wearing, their industrial application is limited because the establishment of a threshold value for monitoring strongly depends on process variables.

1. Introducción

La automatización de los procesos de manufactura juegan un rol importante en el incremento de la productividad y en la confiabilidad de los sistemas de producción sin personal. El fenómeno de emisión acústica (EA) puede ser usado en el monitoreo de los procesos de mecanizado. La principal ventaja de la EA es que el rango de frecuencias de sus señales es mucho mayor que los de las vibraciones de las máquinas y los ruidos ambientales y además no es intrusivo en las operaciones de corte. Por otro lado la EA está directamente relacionada con el estado de la herramienta, ya que es generada por la deformación plástica, rozamiento, fractura de virutas y propagación de fisuras.

En el trabajo de Kannatey-Assibu y Dornfeld ⁽¹⁾ se establece que los procesos de deformación plástica y la

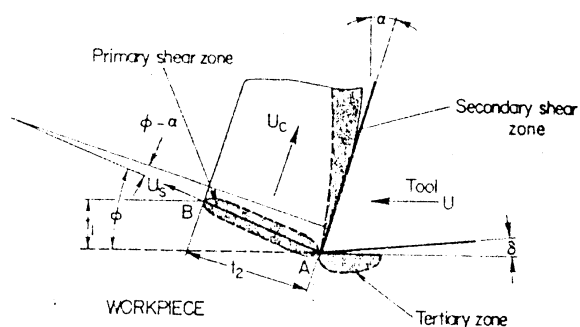
fractura proporcionan las fuentes más importantes de EA que ocurren en el maquinado de metales. Podemos distinguir tres zonas en la generación de fuentes de EA:

Zona de deformación primaria: el filo de la herramienta al ir poniéndose en contacto y presionar al material, hace que la zona que se encuentre delante del filo se corte y la viruta así formada se mueve sobre la cara anterior de la herramienta deformándose parcialmente.

Zona de deformación secundaria: es la interfase viruta-herramienta donde hay rozamiento y deformación parcial.

Zona terciaria: el rozamiento entre la superficie nueva generada por el arranque de la viruta y el flanco constituye una fuente de EA.

También cabe agregar como fuente, la rotura de viruta y la caída de viruta, ya sea continua o discontinua, sobre el material de trabajo o herramienta ⁽¹⁾. En la figura 1 se muestra la localización de dichas zonas.



α = ángulo de ataque
 δ = ángulo del flanco
 ϕ = ángulo de corte
 U = velocidad de corte
 U_c = velocidad de la viruta
 U_s = velocidad de corte
 t_1 = ancho de viruta sin cortar
 t = ancho de la viruta

Fig.1 Zonas de generación de fuentes de EA en torneado (Referencia 1).

Se han realizado estudios teóricos que relacionan diversos parámetros de corte con el valor cuadrático medio de la señal (RMS) llegándose a la relación de la fórmula 1.1. Esta relación deducida por Kannatey-Assibu y Dornfeld ⁽¹⁾ se concentra en las dos primeras zonas productoras de

EA. La generación de EA por desprendimiento de viruta puede ser minimizada desviando la viruta formada fuera del área de trabajo. Las fuentes de la zona terciaria pueden ser disminuidas usando herramientas afiladas y considerando sólo la etapa inicial del mecanizado.

$$RMS = C_4 \operatorname{sen} \mathbf{a} \left[t_k b_1 U \left\{ \frac{\cos \mathbf{a}}{\operatorname{sen} \mathbf{f} \cos(\mathbf{f} - \mathbf{a})} t_1 + \frac{1}{3} (l + 2l_1) \frac{\operatorname{sen} \mathbf{a}}{\cos(\mathbf{f} - \mathbf{a})} \right\} \right]^{1/2} \quad (1.1)$$

b_1 = ancho del corte
 U = velocidad de corte
 U_c = velocidad de la viruta
 l = largo de la zona de contacto herramienta-viruta
 l_1 = largo de la zona de pegado (sticking)

t_1 = velocidad de alimentación
 \mathbf{a} = ángulo de ataque
 \mathbf{f} = ángulo de corte

Al avanzar el desgaste cambia progresivamente la geometría de la herramienta y con ello los valores y la constante en la fórmula de arriba. Además, en operaciones comunes de torneado, es importante la EA generada en la zona terciaria. Son estas las razones por la cual se hace un estudio estadístico de diversos parámetros de la señal.

con el desarrollo de la teoría de las onditas (wavelets) hacia fines de 1980 y principios de los 90, Wu y Du ⁽³⁾ introdujeron la transformada wavelet packet en el procesamiento de las señales de vibraciones en el mecanizado. Los coeficientes obtenidos de la transformación son luego usados como parámetros para determinar el estado de la herramienta.

Dentro de ellas cabe mencionar el uso de los parámetros estadísticos skew y kurtosis para el nivel de RMS de EA calculados considerando que dicha señal tiene distribución β ⁽²⁾. Ambos muestran una fuerte variación con el desgaste; el valor de la pendiente de la curva skew/kurtosis vs. desgaste se incrementa a medida que progresa el último.

Siguiendo otra línea de análisis, otros investigadores han empleado lógica difusa (fuzzy logic) como metodología de clasificación ⁽⁴⁾. Fu, Hope y Javed usaron lógica difusa para fusionar los parámetros obtenidos de cuatro señales: corriente, fuerza de corte, emisión acústica y vibraciones, ya que según estos autores combinando las ventajas parciales de múltiples sensores se hace más confiable el sistema.

Otra clase de parámetros pueden ser extraídos mediante la transformada de Fourier para determinar los rangos de frecuencias predominantes en los eventos de tipo continuo. Una señal continua es tal que el tiempo promedio entre emisiones de similar amplitud sea menor o comparable con la duración de la emisión. En la emisión continua no están bien definidos el comienzo y el final de los eventos. El problema reside en las señales de tipo discontinuo, ya que la transformada de Fourier no puede generar una dependencia de la frecuencia en el tiempo porque su base exponencial se extiende sobre toda la duración de la señal. Es por ello que se han usado otro tipo de transformadas que incluyan esta dependencia. Así,

El objetivo del presente trabajo será realizar procesamientos a las señales y parámetros de la misma obtenidos en el proceso de torneado cilíndrico con el fin de determinar el estado de la herramienta. Se realizarán promedios de los parámetros obtenidos directamente del sistema de EA, análisis de las frecuencias aparecidas y estudio de las señales en el marco del ruido 1/f. En dichos análisis se usará FFT (Fast Fourier Transform) en las señales de tipo continuo que son las directamente relacionadas con el desgaste. Este trabajo es parte de una tesis de maestría que se está realizando en el Instituto de

Tecnología “Prof. Jorge A. Sábato” y es continuación de la línea de investigación abierta por J. O. Masetro ⁽⁵⁾ y seguida por T. Pérez Gallego ⁽⁶⁾.

2. Equipo experimental

2.1. Materiales

Se usaron barras de dos materiales distintos: SAE 1010 y SAE 12L14.

El tamaño de grano del acero SAE 1010 es heterogéneo, con granos grandes entre 7 y 8 ($32\ \mu\text{m}$ y $22\ \mu\text{m}$) y los chicos entre 9 y 10 ($16\ \mu\text{m}$ y $10\ \mu\text{m}$) según Norma ASTM E112. Según Norma ASTM E45 método A se encontraron inclusiones tipo D2 (óxidos globulares) serie gruesa. Las inclusiones tenían contenidos variables de Al, Si, Mn, S, Ca y Fe. El tamaño promedio de los mismos es de $2\ \mu\text{m}$. También se observaron bandas de perlita en la dirección de trefilación (dirección longitudinal) con una separación intermedia de $145\ \mu\text{m}$. El perfil de dureza a lo largo del diámetro tiene un promedio de 86 HRB con un desvío inferior al 5%.

El tamaño de grano del acero SAE 12L14 es 8 ($22\ \mu\text{m}$). Se encontraron inclusiones del tipo D1 (óxidos globulares) serie gruesa y tipo A5 (sulfuros) serie fina. Las inclusiones y precipitados tenían contenidos de S, Pb, Mn, Fe. El tamaño de las inclusiones y precipitados es de

$3\ \mu\text{m}$. Los precipitados con Pb son alargados y tienen tamaños variables desde los $15\ \mu\text{m}$ hasta los $80\ \mu\text{m}$. Se observaron bandas de inclusiones en la sección longitudinal (sentido de trefilación) con una separación promedio de $86\ \mu\text{m}$. El perfil de dureza a lo largo del diámetro tiene un promedio de 87 HRB con un desvío menor al 5%.

2.2. Sistema de Emisión acústica

El sistema utilizado en la experiencia es el MISTRAS 2001 de Physical Acoustics Corporation (PAC). Las señales de EA provenientes del proceso son convertidas a señales eléctricas por los sensores, luego amplificadas por los preamplificadores (40 dB) y medidas por la tarjeta AEDSP-32/16B que contiene 2 canales para procesamiento de señales y forma de onda. En los experimentos fue usado uno solo de estos canales con un sensor colocado con acoplante en la parte posterior del portainsero. En la figura 2 se muestra un esquema del dispositivo experimental.

La señal fue filtrada entre 20 kHz y 1200 kHz y luego digitalizada a 4 Megasamples por segundo y 16 bits de resolución. La capacidad máxima del sistema para procesamiento de hits y extracción de sus parámetros es superior a 20000 hits por segundo.

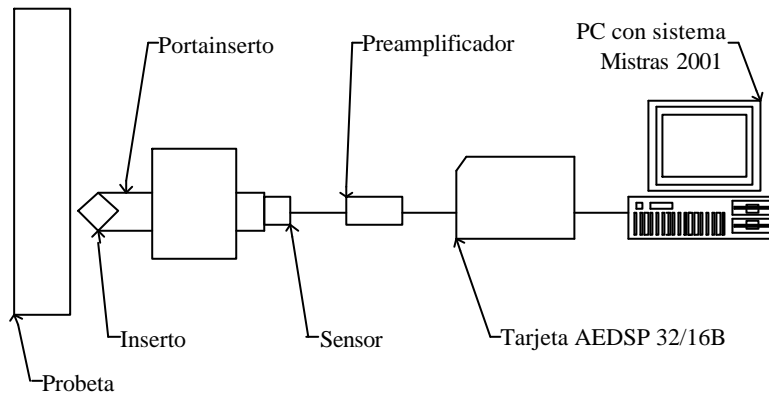


Fig. 2 Esquema del dispositivo experimental

2.3. Procedimiento experimental

Se tornearon las barras con un torno Turri 250 de 20kW e inserto de carburo metálico P20. Al final del torneado de

cada barra se midió el desgaste del inserto con un microscopio Leitz Wetzlar con tornillos micrométricos de acuerdo a la norma ISO 3685. Los valores de los parámetros se dan en la Tabla I.

Tabla I. Parámetros de los ensayos

Material	Velocidad de torno (rpm)	Velocidad de alimentación (mm/rev)	Profundidad de Pasada (mm)	Número de pasadas	Velocidad de corte Promedio (m/min)
SAE 1010	1000	0.53	0.25	6	127.6
SAE 12L14	1500	0.24	1.25	2	173.2

Se torneó un lote de 15 probetas de 335 mm de acero 1010 en 6 pasadas y otro lote de 15 probetas de 325 mm de acero 12L14 con 2 pasadas. Al finalizar cada lote, la disminución del diámetro en las probetas provoca una disminución en la velocidad de corte ya que el torno no dispone de un regulador de velocidad para ajustarla. Esto acarrea un error en la velocidad, si la consideráramos constante y de valor igual al promedio, del 2.2% y 3.4% respectivamente.

Cada pasada de cada probeta fue almacenada en un archivo distinto. Las probetas “a” corresponden al acero 1010 y las “b” al acero 12L14. Las probetas están numeradas de acuerdo al orden temporal en que fue realizado el ensayo. La letra “p” indica el número de pasada. Estos archivos contienen un promedio de 160 eventos cada uno en el desgaste inicial e intermedio y de 540 para el desgaste severo del acero 1010. En el acero 12L14 hay un promedio de 3100 eventos por archivo. Estos archivos guardan también información sobre los parámetros analizados para cada uno de los eventos.

En el torneado del acero 1010, al ser de baja maquinabilidad, se eligió una profundidad de pasada pequeña. Esto produjo un desgaste del inserto en la punta del mismo, no estando contemplado un valor límite de desgaste en la norma. Por lo tanto se tomó como valor de desgaste la longitud máxima desgastada en la punta.

3. Resultados y discusión

Al finalizar la última pasada del acero 1010, el inserto quedó severamente desgastado. Esto no ocurrió en el acero 12L14 que si bien llegó al valor máximo propuesto por la norma ($VB_B = 0.3\text{mm}$) no acusa una significativa

diferencia con los estadios iniciales del desgaste. Para el análisis se escogieron las 4 primeras probetas (a9p1 a a12p1), 2 intermedias (a13p3, a14p3) y las 4 últimas (a12p6 a a15p6).

Un primer procesamiento de datos consistió en tomar los parámetros que extrae el sistema de EA y realizar un promedio de los mismos en cada una de las pasadas. Así para el acero 1010 tenemos un aumento en los eventos por segundo (hit rate) (fig.3) y por otra parte una marcada disminución de las cuentas por segundo (fig.4), cuentas (fig.5) y amplitud (fig.6) entre el estado de desgaste severo y el de desgaste inicial e intermedio. Asimismo no se observan grandes diferencias para los parámetros arriba mencionados entre el estado inicial y el intermedio.

El valor RMS muestra un aumento en su magnitud con la velocidad de corte como fue comprobado por Heiple, Carpenter, Armentrout y M^c Manigle ⁽⁷⁾. No obstante ello, este parámetro no fue considerado ya que el desvío de sus valores era mayor a los promedios obtenidos. Esto ocurre porque el instrumental toma valores de RMS cada 10 mV y estando los valores comprendidos entre 0 y 20 mV no es concluyente la diferencia observada. Un fenómeno similar en relación con el desvío ocurre con el parámetro energía que muestra una disminución de su valor en el estado de desgaste severo.

El rise time también presenta desvíos importantes que no hacen significativas las diferencias entre los estados inicial e intermedio y el final. También cabe mencionar que al ser la mayoría de las ondas captadas de tipo continuo es difícil la localización de un pico. La detección de este pico por parte del sistema se da a través de la fijación de un parámetro del equipo (peak definition time) que actúa como valor de referencia para localizar el rise time.

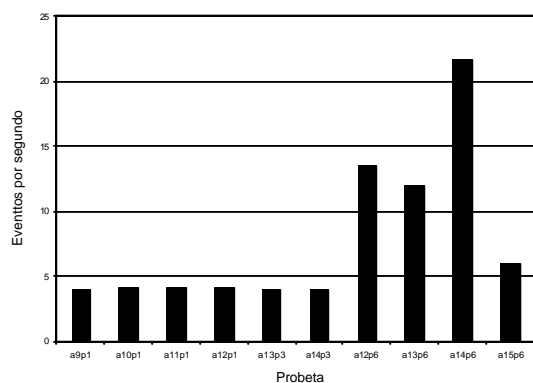


Fig.3 Evolución Eventos por segundo

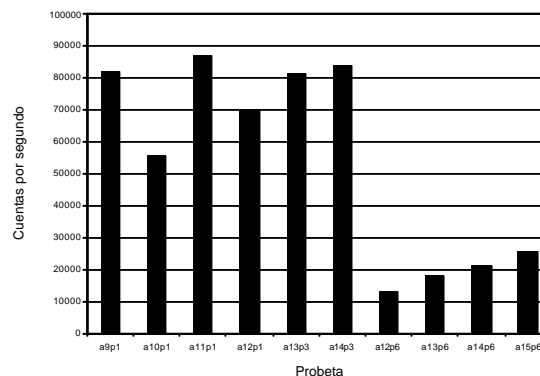


Fig. 4 Evolución Cuentas por segundo

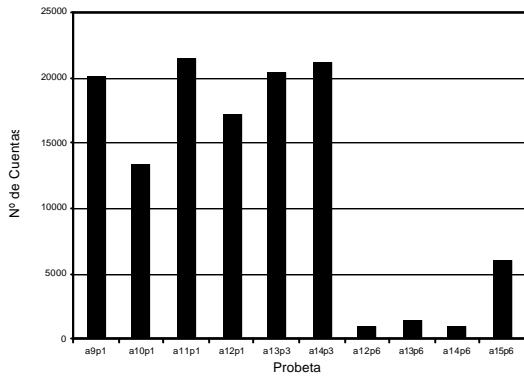


Fig.5 Evolución Número de Cuentas

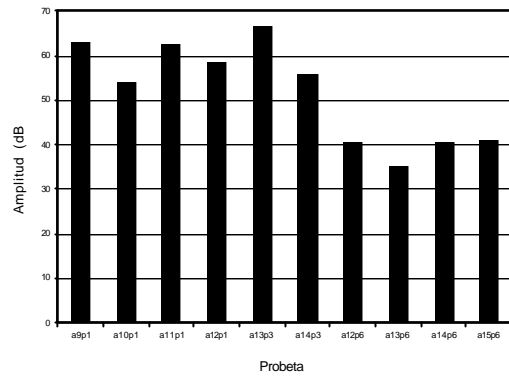


Fig.6 Evolución Amplitud

En cuanto al acero 12L14, la diferencia vista en el 1010 no pudo ser detectada ya que si bien se llegó al valor límite de la norma, el inserto no estaba severamente desgastado. Para el análisis se tomaran las 2 primeras probetas (b2p1,b3p1) y las 2 últimas (b14p2,b15p2). Es de mencionar que hay una caída fuerte del valor de las

cuentas por segundo (fig.8) de la primera probeta con respecto a la segunda. Este hecho también se ve reflejado en la aparición de altas frecuencias (530 KHz) en la primera de las probetas y no en las restantes. Con respecto al valor RMS, energía y rise time valen las aclaraciones anteriores.

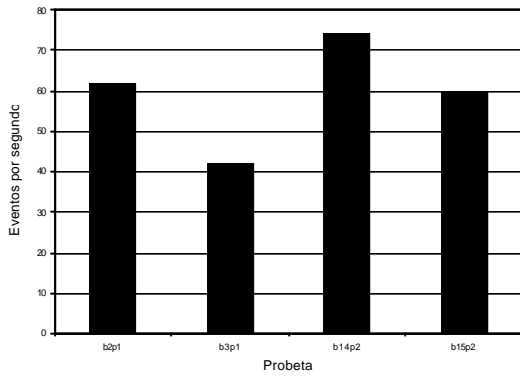


Fig.7 Evolución Eventos por segundo

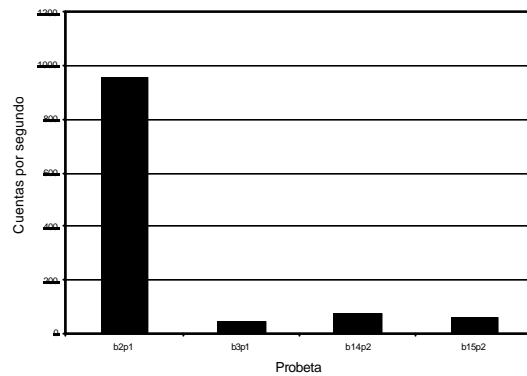


Fig.8 Evolución Cuentas por segundo

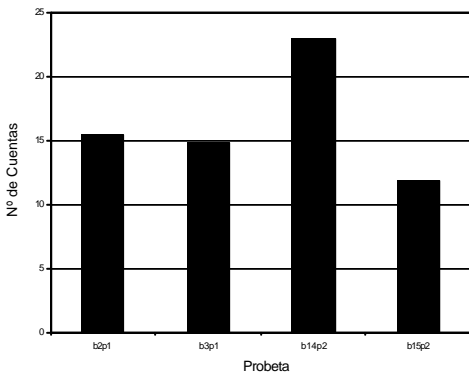


Fig.9 Evolución Número de Cuentas

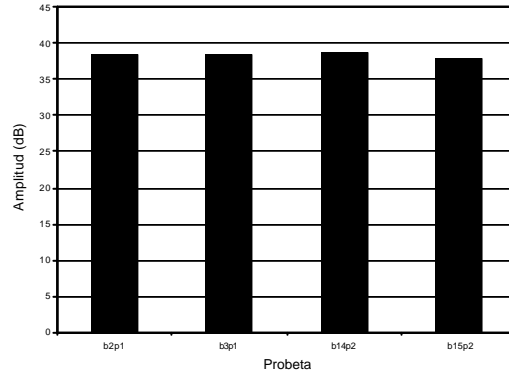


Fig.10 Evolución de la Amplitud

En cuanto a las diferencias en la cantidad de eventos por segundo entre materiales, si comparamos los estados iniciales e intermedios de ambos, vemos que el acero 12L14 (fig.7) es un orden de magnitud mayor al 1010. Los eventos del primero son de menor duración que los del segundo y por ello el sistema de EA registra mayor número de eventos. Esto se puede deber a que en el primero el inserto corta al material desprendiéndose una viruta más corta en tanto que en el segundo caso se

produce un arranque del material de modo que hay que cortar manualmente la viruta. La fractura de la viruta es una fuente más de emisión importante en el acero 12L14 y no en acero 1010.

Con respecto al count rate vemos que en el acero 1010 es casi dos órdenes de magnitud mayor al observado en el acero 12L14 (fig.8) para los estados iniciales e intermedios. Este hecho se ve también en un contenido

mayor de frecuencias altas del primero con respecto al segundo. El predominio de las frecuencias relativamente bajas puede ser asociados a una mayor importancia de los procesos estocásticos de memoria larga en el material ⁽⁸⁾.

Para la amplitud de los eventos, al estar evaluada en dB, no notamos las diferencias anteriores. Sin embargo es notorio que el desvío de amplitudes promedio entre cada probeta de 12L14 (fig.10) es menor que entre las del 1010.

Un segundo nivel de análisis hecho a las señales fue obtener su espectro mediante el algoritmo FFT. Se han exceptuado de dicho análisis las señales de tipo discontinuo por estar éstas asociadas a golpes sobre herramental o fractura de la herramienta y no directamente al desgaste como las continuas ⁽⁹⁾.

La forma de separar las ondas de tipo continuo de las discontinuas es mediante el control de estacionariedad, siguiendo una propuesta de Y. M. Niu, Y. S. Wong, G. S. Hong, T. I. Liu ⁽¹⁰⁾. Las señales continuas son estacionarias en el sentido de que el valor medio ($E(X_t)$) y

la autocorrelación ($R_x(t, t+t)$) de la misma son independientes del tiempo, mientras que las discontinuas son moduladas en la frecuencia y magnitud. Una señal es estacionaria si:

$$E(X_t) = m_k \quad R_x(t, t+t) = R_x(t) \quad (3.1)$$

$$|E(X_t) - m_k| \leq \epsilon \quad |R_x(t, t+t) - R_x(t)| \leq \epsilon \quad (3.2)$$

siendo m_k y $R_x(t)$ constantes. En la fórmula 3.2 se aplica una tolerancia en el control de la estacionariedad.

En el acero 1010 vemos en el histograma de frecuencias (fig.11) que crece la aparición de bajas frecuencias (90-150 Khz) en tanto que disminuye el contenido de frecuencias mayores (500-630 Khz) a medida que progresa el desgaste del inserto. En el acero 12L14 (fig.12) también vemos un descenso del contenido en frecuencias altas en la segunda probeta, aunque la distribución es más errática que en el caso del acero 1010, sin una tendencia tan marcada. Los valores de frecuencia baja están asociados a procesos estocásticos de memoria larga ⁽⁸⁾.

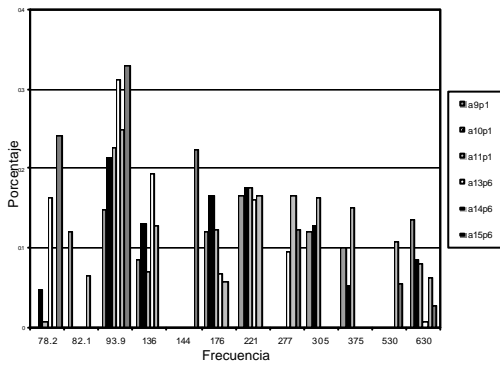


Fig.11 Histograma de frecuencias para acero SAE 1010

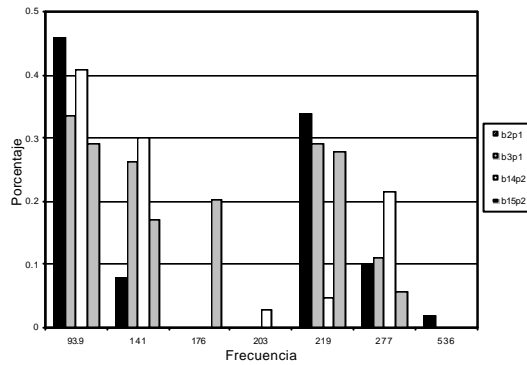


Fig.12 Histograma de frecuencias para acero SAE 12L14

Un tercer nivel de análisis consistió en considerar a las señales en el marco del ruido 1/f. En él se calcula la densidad de potencia espectral de la transformada de Fourier de la autocorrelación de la señal. Dicha densidad de potencia en función de la frecuencia en un gráfico log-log puede ser aproximada por una recta cuya pendiente es el parámetro β .

Para ello este parámetro fue calculado para cada evento de algunos archivos (nº de probeta y pasada) y luego para ese archivo se realiza un promedio y momentos estadísticos de mayor orden del parámetro sobre aproximadamente 265 y 595 eventos para acero 1010 y 12L14 respectivamente (figs. 13 y 14).

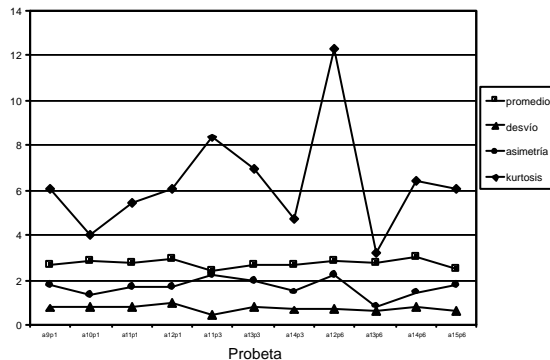


Fig. 13 Evolución del promedio, desvío, skew y kurtosis del parámetro **b** para acero 1010

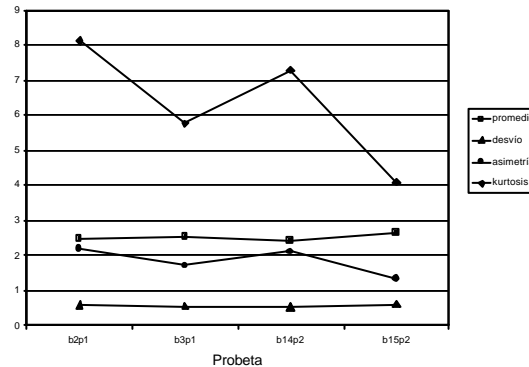


Fig. 14 Evolución del promedio, desvío, skew y kurtosis del parámetro **b** para acero 12L14

Como vemos el valor medio del parámetro tiene poca desviación entre las sucesivas probetas, sin marcar tampoco una tendencia definida. Sin embargo es de notar picos en la kurtosis de dicho parámetro que puede deberse a un cambio en las condiciones de torneado, que merece una mayor profundidad de explicación en el futuro.

4. Conclusiones

Las cuentas por segundo, eventos por segundo, energía por segundo, amplitud y cuentas pueden ser considerados como parámetros indicativos de un desgaste severo. Estos parámetros son muy sensibles a las variables del proceso de torneado razón por la cual es necesario el desarrollo de técnicas de análisis de señales que permitan extraer parámetros independientes de dichas variables ⁽²⁾. Esto queda visto en las diferencias de aquellas cantidades entre los dos materiales trabajados.

El valor RMS sin procesamiento posterior no es buen indicador del desgaste. Es por ello que investigadores

Se agradece la participación de Martín Gutiérrez y Ernesto Alonso.

Referencias

1. E. Kannatey-Asibu Jr., D. A. Dornfeld, *Journal of Engineering for Industry*, "Quantitative Relationships for Acoustic Emission from Orthogonal Metal Cutting", Vol. 103, 330-340, (1981).
2. E. Kannatey-Asibu Jr., D. A. Dornfeld, "A study of tool wear using statistical analysis of metal cutting Acoustic Emission", *Wear*, Vol. 76, 247-261, (1982).
3. Y. Wu, R. Du, "Feature extraction and assesment using wavelet packets for monitoring of machining processes", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 10, 29-53, (1996).
4. P. Fu, A. D. Hope, M. A. Javed, "Fuzzy classification of milling tool wear", *Insight*, Vol. 39 (8), 553-557, (1997).
5. J. O. Masetro, J. E. Ruzzante, "Monitoreo del desgaste de una herramienta utilizando la técnica de emisión acústica", Instituto Balseiro, Comisión Nacional de Energía Atómica Universidad Nacional de Cuyo, Universidad de Buenos Aires (Argentina), (1998).
6. T. Pérez Gallego, "Aplicación de emisión acústica (EA) a la monitorización de procesos de corte", Proyecto fin de carrera, Universidad de Valladolid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, (1999).
7. C. R. Heiple, S. H. Carpenter, D. L. Armentrout, A. M. Manigle, "Origin of Acoustic Emission produced during single point machining", *Materials Evaluation*, Vol. 52, 590-596, (1994).
8. T. Pérez Gallego, J. Masetro, E. Serrano, R. Piotrkowski, J. E. Ruzzante, "Characteristic parameters from acoustic emission signals in wear of cutting tools", aceptado para su presentación en el "15th World Conference on Non-Destructive Testing", Roma, Italia, 15-21 de Octubre de 2000.
9. E. Emel, E. Kannatey-Asibu Jr., "Tool failure monitoring in turning by pattern recognition analysis of Acoustic Emission signals", *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 110, 137-145, (1988).
10. Y. M. Niu, Y. S. Wong, G. S. Hong, T. I. Liu, "Multicategory classification of tool conditions using wavelet packets and ART2 network", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 120, 807-816, (1998).

como Kannatey-Asibu y Dornfeld ⁽²⁾ han usado coeficientes estadísticos del mismo como ser skew y kurtosis, calculados suponiendo una distribución β del RMS. También es de destacar la influencia de la velocidad de corte y tipo de material en la variabilidad de este parámetro; razones adicionales por las cuales no lo hacen apto para el monitoreo del desgaste dentro de un amplio rango de operaciones de mecanizado.

A medida que progresa el desgaste se ve un predominio en la aparición de picos en las bajas frecuencias con respecto a los estadios iniciales del desgaste. Este fenómeno del corrimiento del contenido de frecuencias de la señal hacia bajas frecuencias ha sido visto por otros autores ⁽⁷⁾. Esto denota la producción de un fenómeno no estacionario, lo que implica la realización de análisis con la teoría de wavelets en la continuación de este trabajo.

El coeficiente β calculado en el marco del ruido 1/f no muestra una tendencia marcada y por lo tanto un valor umbral que pueda ser usado para discernir estados de desgaste.