

## ESTUDIO CORRELACIONAL DE LA SEÑAL ACÚSTICA Y LA DETECCIÓN DEL DESGASTE DE LA HERRAMIENTA DE CORTE EN UN PROCESO DE TALADRADO CNC

### CORRELATIONAL STUDY OF THE ACOUSTIC SIGNAL AND THE DETECTION OF THE WEAR OF THE CUTTING TOOL IN A CNC DRILLING PROCESS

MSc. Jorge Enrique Meneses Flórez \*, Ing. Néstor Norbey Peña García \*

\* **Universidad Industrial de Santander (UIS)**, Escuela de Ingeniería Mecánica.  
Grupo de investigación CPS  
Ciudad Universitaria, Bucaramanga, Santander, Colombia.  
Tel.: (+577) 634 4000 Ext. 2483/2829.  
E-mail: jmeneses@uis.edu.co, nnp10@hotmail.com

**Resumen:** Se requieren estrategias para evitar que las máquinas herramientas CNC trabajen con una herramienta de corte que se ha desgastado, o sustituir ésta sin haber alcanzado el máximo de su vida útil. Se presenta un estudio de correlación, encontrada entre la señal acústica y la detección del desgaste de una herramienta durante un proceso de taladrado, mediante el diseño y desarrollo de ensayos que permitieron la captura, procesamiento y análisis de emisiones sonoras desde el dominio del tiempo (valor eficaz -RMS-, amplitud, rango, asimetría, curtosis, autocorrelación, correlación, conteo de picos), la frecuencia (Espectro de potencia, PSD, Espectrograma) y la Transformada Wavelet. Los resultados visualizaron dos estados de la vida de la herramienta de corte (con falla - sin falla), los cuales en prospectiva permitirán realizar diagnósticos automatizados sobre la condición de las herramientas.

**Palabras clave:** Monitoreo basado en condición, desgaste de herramientas, acústica, análisis de sonido

**Abstract:** Strategies are required to prevent CNC machine tools from working with a cutting tool that has worn out, or to replace it without having reached the maximum of its useful life. A correlation study is presented, found between the acoustic signal and the detection of wear of a tool during a drilling process, through the design and development of trials that allowed the capture, processing and analysis of sound emissions from the time domain (effective value -RMS-, amplitude, range, asymmetry, kurtosis, autocorrelation, correlation, peak counting), frequency (Power spectrum, PSD, Spectrogram) and Wavelet Transform. The results visualized two states of the life of the tool of cutting (with failure - without failure), which in prospective will allow to realize automated diagnoses on the condition of the tools.

**Keywords:** Condition-based monitoring, tool wear, acoustics, sound analysis

## 1. INTRODUCCIÓN

Las máquinas herramientas CNC, han presentado avances al ofrecer a la industria mayor versatilidad,

confiabilidad y precisión en la elaboración de piezas que conllevan al rendimiento del sistema de producción y mejoras continuas en los productos. Durante los procesos de maquinado como el

taladrado, la inexactitud en la predicción del desgaste de las herramientas de corte disminuye considerablemente la calidad de la pieza final, además de ser removida aun cuando el uso no maximiza su vida útil. A pesar del actual desarrollo tecnológico para estimar y evaluar la vida de las herramientas de corte, la industria manufacturera sigue empleando múltiples métodos empíricos que consisten en establecer el número de horas de maquinado, en determinar la relación entre la corriente consumida por el husillo y el desgaste de la herramienta mediante la fricción y la fuerza de trabajo; y por último, la percepción de cambios de sonido en función de la facultad auditiva de los operarios experimentados.

Investigadores han realizado estudios sobre las técnicas empíricas de monitoreo para determinar la generación de las fallas y deterioro del estado de las herramientas. (Jantunen, 2002) denomina el problema del número de horas de maquinado, como un cambio excesivo e innecesario del instrumento de corte que, bajo condiciones contantes en la automatización, presenta valores conservativos al incrementar los costos en la producción; asimismo, afirma que el uso constante en la práctica de éste método, resulta desconcertante al no determinar con exactitud las fallas y variaciones, interrumpiendo el éxito aplicativo en el medio industrial. (Rajesh y Marimuthu, 2012), proponen el modelo de relación del desgaste de la broca y la corriente eléctrica consumida por el husillo de la máquina en asocio a la fricción y fuerza de trabajo, concluyendo su análisis investigativo que las fluctuaciones en las señales permean el desarrollo de resultados específicos en adaptación y resolución de la problemática. Basado en un análisis perspectivo de los operarios experimentados de las máquinas herramientas, su facultad auditiva se constituye en la estrategia de evaluación que estima la capacidad de corte de las herramientas, mediante los cambios en los sonidos generados durante los procesos de maquinado, permitiendo identificar y monitorear la iniciación y desarrollo de fallas en respuesta a las características de la emisión acústica. (Boutros y Liang, 2011), estudiaron las señales sonoras en los procesos de fresado, estableciendo patrones de comportamiento para conformar un modelo de detección como lo es "Markov". (Mannan, 2000) efectúa la caracterización del sonido propio del proceso de torneado, logrando con la técnica Transformada Wavelet, monitorear el estado de las herramientas de manera exitosa a través de los sistemas de control.

Aunque la estrategia común de todos los trabajos, ha sido la aplicación de métodos empíricos indirectos para estimar la condición de la herramienta en procesos de mecanizado, o por el contrario aplicar las señales acústicas en procesos de fresado y torneado; la fiabilidad del fenómeno de emisión acústica en el ejercicio de monitorear los procesos de taladrado, tal como lo expone este estudio, permite establecer la existencia de una tendencia lineal en la relación entre el valor cuadrático medio de la presión de la señal sonora y el número de agujeros perforados en una pieza de acero taladrada en seco a altas velocidades (3000-5000 rpm).

El presente artículo tiene como objeto mostrar el estudio del comportamiento de la señal acústica en un proceso de taladrado en acero, en relación al desgaste de la herramienta de corte. Este trabajo se desarrolló a partir del monitoreo que basado en un sistema de adquisición de datos, permite la captura, procesamiento y análisis de emisiones sonoras, tal como se observa en la Figura 1.

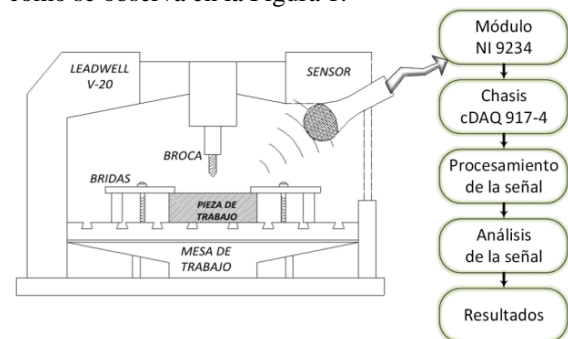


Fig. 1. Estructura general de la investigación.

## 2. METODOLOGÍA

La metodología empleada en el estudio experimental de la señal acústica, se fundamentó en los análisis del dominio del tiempo (Valor eficaz (RMS), Amplitud, Rango, Asimetría, Curtosis, Autocorrelación, Correlación, Conteo de Picos), del dominio de la frecuencia (Espectro de potencia y Espectrograma) y la técnica Transformada Wavelet, para extraer características que pudieran ser empleadas a posteriori, en la alimentación de sistemas de control, que apoyados en algoritmos de decisión, permitan la realización de diagnósticos automatizados del estado del instrumento de corte, en máquinas de Control Numérico Computarizado.

La primera parte del estudio se basó en el diseño del ensayo, con el propósito de adquirir la señal acústica propia del proceso de taladrado. El ensayo debía cumplir con tres aspectos:

- Realizar el mecanizado repetitivo de agujeros.
- Garantizar que los parámetros de corte fueran constantes y repetibles.
- Capturar señales de calidad, es decir, que éstas no fueran permeadas por condiciones externas o de funcionamiento de la máquina herramienta.

## 2.1 Diseño del ensayo

El ensayo implicó inducir daño en la herramienta de corte, perforando un número indeterminado de agujeros y teniendo en cuenta como criterio de falla, un aumento considerable en la intensidad del sonido. Se realizaron cuatro ensayos llevando la herramienta de corte al desarrollo de fallas, y tres ensayos adicionales sin inducir deterioro en la misma, con el propósito de establecer la incidencia en el comportamiento de la señal acústica asociadas a las variables del sensor empleado (micrófono) y la variación del flujo refrigerante. En los siguientes numerales se muestran los componentes considerados al diseñar y realizar los ensayos.

### 2.1.1 Herramienta de corte y parámetros de corte

*Tabla 1. Parámetros de corte y datos de operación*

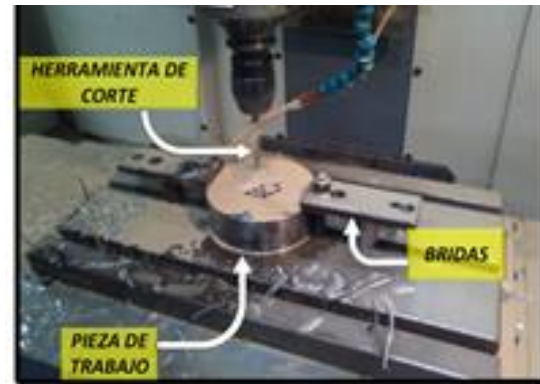
Parámetros de Corte	Diámetro de la broca	
	6[mm]	8 [mm]
Velocidad de rotación [rpm]	1061	796
Velocidad de corte [m/min]	20	20
Avance [mm/rev]	0,109	0,138
Velocidad de avance [mm/min]	116	110
Torque [Nm]	1,56	3,32
Potencia [kW]	0,199	0,318
Número de agujeros	139	132
Tiempo/agujero [s]	13,0	13,7

Las operaciones de taladrado se realizaron con brocas de 6 y 8 mm de diámetro y tomando como referencia la dureza, se eligió el acero SAE 4140 como material de la pieza de trabajo, con el propósito de hacer fallar la herramienta de corte con un número bajo de operaciones de taladrado y, en consecuencia, adquirir, manipular y procesar un menor volumen de información. Se usaron probetas cilíndricas de 6 pulgadas de diámetro y 2 pulgadas de longitud; la profundidad de los agujeros a taladrar se estableció en 1 pulgada. Ver en la Tabla 1 los parámetros de corte utilizados.

### 2.1.2 Sujeción de la pieza de trabajo

El centro mecanizado CNC (Leadwell V-20), donde se realizaron los ensayos, permite alcanzar velocidades de 8000 RPM con recorridos de 510 mm y 350 mm en los ejes X e Y respectivamente,

lo cual brindó garantía en el estudio y repetitividad en los ensayos. En la Figura 2, se muestra el diseño de la sujeción basada en dos bridas fijadas a la mesa, las cuales minimizaron las vibraciones de la pieza, minimizando el impacto en la calidad de la señal acústica.



*Fig. 2. Sujeción de la pieza de trabajo*

### 2.1.3 Distribución y secuencia de taladrado

Con la finalidad de observar la influencia de la simetría de maquinado y la variación de la dureza del material sobre las señales acústicas, se utilizaron tres secuencias de taladrado: espiral, lineal y mixta. Los agujeros de cada una de las secuencias obedecen a una distribución triangular, con una distancia entre centros de tres radios.

## 2.2 Sistema de adquisición de datos

### 2.2.1 Arquitectura Hardware / Software

Previamente al procesamiento de la información, se realizó la etapa de adquisición de datos, en la cual se mide el fenómeno físico para obtener valores numéricos digitales que pueden ser manipulados por un computador. Se diseñó un sistema de adquisición de señales acústicas conformado por un componente hardware: el chasis NI 917-4 y el módulo NI 9234; y el software LabVIEW, que garantizaron la confiabilidad, versatilidad y precisión en la captura, procesamiento y análisis de las emisiones sonoras. La captura de la señal acústica se realizó a partir del uso de dos micrófonos (sensores) de patrón polar supercardioide y cardioide: TXL 235 Topp Audio (40 Hz-16 kHz) y PG81 Shure (40 Hz-18 kHz) respectivamente, los cuales permitieron no sólo la recolección del sonido en dirección al proceso de taladrado, sino el aislamiento de ruidos exteriores provenientes de otras direcciones. Los sensores se ubicaron a distancia horizontal de 83 cm y a distancia vertical de 65 cm, para evitar el alcance

de golpes de viruta y salpicaduras de líquido refrigerante. Para la selección de estos sensores se realizó un ensayo sobre las respectivas curvas de respuesta en frecuencia.



Fig. 3. Sistema de adquisición de datos.

La señal captada se envió al equipo de cómputo (Figura 3) utilizando el módulo NI 9234, especializado en la adquisición de señales de audio, y el chasis NI cDAQ 917-4. El conjunto (módulo – chasis), posee una resolución de 24 bits y una velocidad máxima de muestreo de 51200 ks/s. Utilizando LabVIEW, se desarrolló una aplicación que visualizó y almacenó de manera sistemática los datos recolectados, utilizando una estructura nemotécnica, ver Tabla 2. Un ejemplo de la nomenclatura se presenta en la Figura 4.

Tabla 2. Nomenclatura para almacenar las señales

Símbolo	BDXYYY
<b>B</b>	Grabación de la señal generada por una broca
<b>D</b>	Diámetro de la broca empleada [mm]
<b>X</b>	Número del ensayo realizado
<b>YYY</b>	Número del agujero realizado

Nota: Cada grabación corresponde al sonido propio de la perforación de un solo agujero

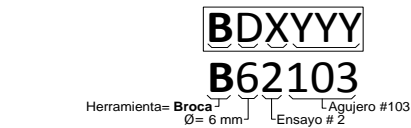


Fig. 4. Ejemplo de la nomenclatura utilizada

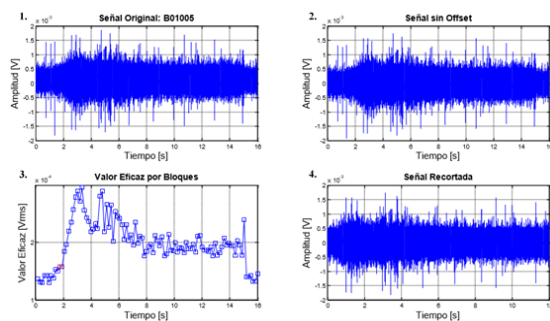


Fig. 5. Procesamiento de las señales

### 2.2.2 Procesamiento de las señales

A las señales adquiridas se les eliminó el offset producido por el sistema de adquisición, ver Figura

5 (numerales 1 y 2). También se seleccionó el intervalo de interés en cada grabación, determinando el inicio del taladrado de cada agujero, tomando como criterio el aumento del valor eficaz de la señal acústica. La Figura 5, numeral 3, presenta la selección del intervalo de interés, y el numeral 4, representa la señal acústica final (recortada y sin offset). Toda la información se almacenó en una matriz para su posterior uso.

## 3. ANÁLISIS DE SEÑALES Y EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS

Con el objetivo de validar la correlación entre el comportamiento característico de la señal acústica y la detección del desgaste en la herramienta de corte del proceso de taladrado, se realizaron los análisis en el dominio del tiempo, dominio de la frecuencia y mediante transformada Wavelet, como criterios fundamentales para el monitoreo de la vida de la herramienta y determinación de la falla en la misma.

Respecto al número de perforaciones realizadas antes de presentar falla la herramienta de corte, se evidenció un comportamiento disímil en cada uno de los ensayos, variando éste desde 74 hasta 592 agujeros. Asimismo, con base en la relación entre los diferentes ensayos, se definió en la ecuación 1, la variable “Vida de la Herramienta [%]”, donde 0% equivale a una herramienta “nueva” y un 100% corresponde a una herramienta que alcanzó el máximo de su vida útil.

$$\text{Vida de la Herramienta [\%]} = \frac{A}{B} * 100 \quad (1)$$

Dónde:

**A**= agujero perforado actualmente

**B**= número máximo de agujeros perforados antes de presentar falla la herramienta, en el ensayo correspondiente.

### 3.1 Análisis en el dominio de tiempo

#### 3.1.1 Valor cuadrático medio del voltaje (RMS)

Tomando la señal acústica de cada agujero taladrado, se calculó el valor cuadrático medio, ver ecuación. (2).

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{n=1}^N X(n)^2} \quad (2)$$

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 6. Se aprecia idéntico comportamiento para las brocas de 6 y 8 mm de diámetro. Se observa la

existencia de dos zonas de interés, la primera zona corresponde a la mayor parte de la vida de la herramienta, aproximadamente el 96%, donde la variación del valor cuadrático medio es relativamente baja, y la segunda zona corresponde al final de la vida de la herramienta, donde se presenta un incremento abrupto en la medición. Este análisis, valor cuadrático medio de la señal acústica, presenta gran potencial para ser empleado en el diagnóstico automático del estado de la herramienta y para la detección de la falla de la misma. Estos resultados contrastan con los reportados por (Rafezi, 2012), donde se apreciaba una tendencia lineal, esto indica una influencia del material empleado como pieza de trabajo.

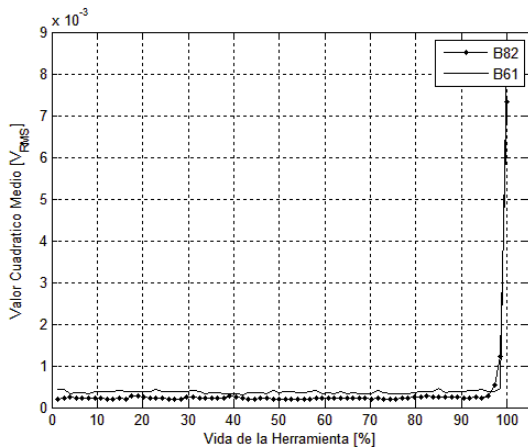


Fig. 6. Valor cuadrático medio en función de la vida de la herramienta.

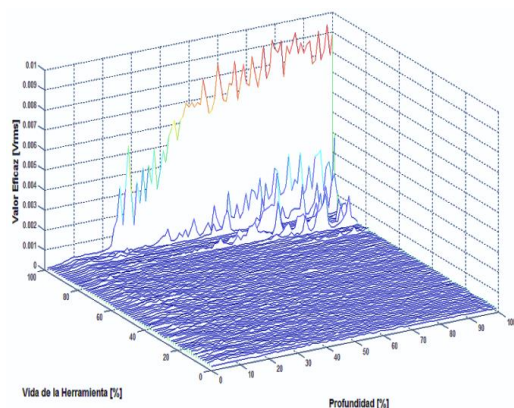


Fig. 7. Valor cuadrático medio en función de la vida y la profundidad taladrada de la broca B81.

Con el fin de analizar el valor cuadrático medio de la señal en función de la profundidad de corte, la señal acústica de cada agujero perforado se dividió en 100 señales (paquetes), cada una de las cuales corresponde a grabaciones con incrementos sucesivos de profundidad de 250 milésimas de

milímetro. Se observó (ver Figura 7) que, a mayor profundidad de corte, el valor cuadrático medio presenta un aumento, este comportamiento fue evidente para ambos diámetros de brocas y podría ser empleado como criterio para evaluar el estado de la herramienta. Estos resultados son similares a los reportados por (Heinemann e Hinduja, 2012), donde fue analizada la emisión acústica en un proceso de taladrado con brocas pequeñas (1.5-3.5 mm) y agujeros profundos (15-35 mm) en un acero AISI 1045.

### 3.1.2. Otros análisis en el dominio del tiempo

Para las señales capturadas, se analizó la amplitud, el rango y el conteo de picos. Se observó un comportamiento similar al presentado en el valor cuadrático medio, pero con una mayor variación y menor potencial de ser empleado. Al analizar la asimetría y curtosis, se observó que presentaban un comportamiento independiente de la vida de la herramienta. En el análisis de la curtosis, además se observó la presencia de valores elevados para agujeros en los cuales ocurrían golpes de corta duración, menores a 0,03 segundos, ver Figura 8.

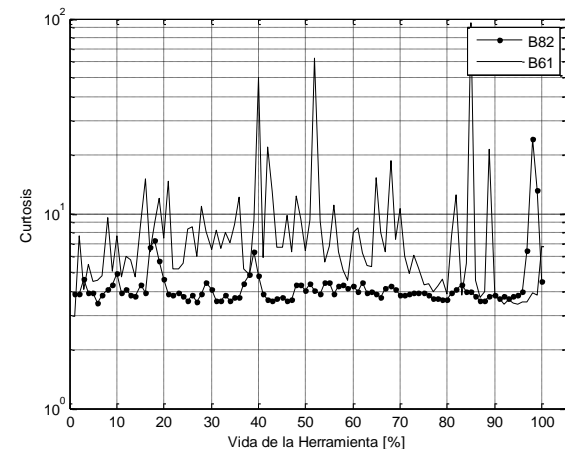


Fig. 8. Curtosis en función de la vida de las brocas

La autocorrelación y correlación, reflejaron un alto componente aleatorio presente en la señal, dado el bajo valor de correlación (0,001-0,2).

## 3.2 Análisis en el dominio de la frecuencia

Se realizó un análisis en el dominio de la frecuencia para buscar comportamientos y patrones que no fueran visibles en el dominio del tiempo y que se relacionaran con el desgaste de la herramienta.

### 3.2.1 Análisis de la densidad espectral de potencia

Debido a que la señal acústica tiene un comportamiento aleatorio se decidió usar el método de Welch para el cálculo del espectro, con lo cual se logra disminuir el ruido a cambio de disminuir la resolución en frecuencia. El sonido adquirido en el proceso de taladrado fue procesado en MATLAB, con una ventana Hamming de 256 puntos, un traslape del 25%, y mediante el método de Welch se obtuvo la densidad espectral de potencia (PSD) de cada agujero, con una resolución de 200 Hz, ver ecuación 3.

$$S_{xx}(\omega) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=1}^N X(n) e^{-i\omega n} \right|^2 \quad (3)$$

En la Figura 9 se puede observar que el espectro permanece constante durante la mayor parte de la vida de la broca, lo cual indica que el sonido es aproximadamente el mismo durante la mayor parte del ciclo de vida de la broca, y presenta un aumento muy significativo al final de su vida, en todo el rango de frecuencias, lo cual podría ser empleado como criterio para determinar el estado de la herramienta.

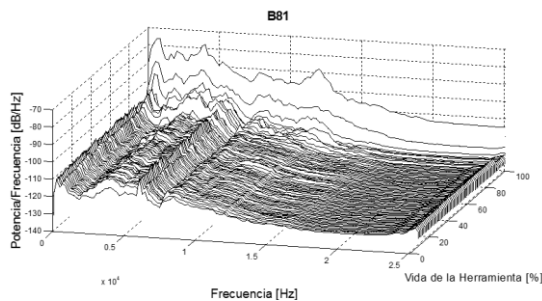


Fig. 9. Espectro en función de la vida de la broca.

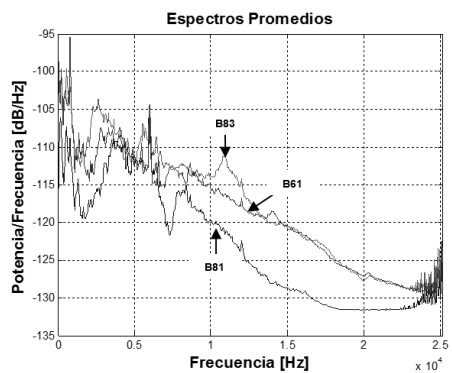


Fig. 10. Espectros promedios

Para incrementar la resolución del análisis y apreciar más detalles, se realizó mediante MATLAB nuevamente, el cálculo de la densidad espectral de potencia, usando el método Welch con una ventana Hamming de 1024 puntos y 25% de traslape, lo cual produjo una resolución de 50 Hz. El análisis se realizó para 40 agujeros de cada broca, igualmente espaciados durante toda la vida de la herramienta y posteriormente se promediaron

los correspondientes a la primera zona donde existió una baja variación, con el fin de disminuir el ruido y obtener un espectro característico. El comportamiento característico se representa en la Figura 10, pudiéndose observar que:

- Las brocas B81 y B83 operaron bajo las mismas +-condiciones de corte, pero presentaron espectros muy distintos, lo cual indicó una fuerte influencia del aparato de medición (micrófono).
- El espectro característico de las brocas no está concentrado en un rango específico de frecuencia.

En la Figura 11 se compara el espectro generado por la máquina CNC en funcionamiento sin taladrar y se observa que la mayor parte de la potencia está concentrada en la zona de baja frecuencia (0-2 kHz) y con un pico de 6000 Hz, el cual coincide en todas las brocas.

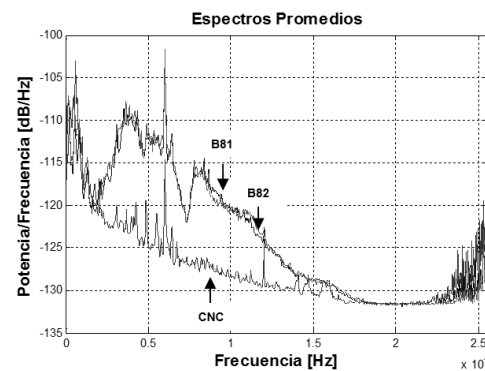


Fig. 11. Espectro promedio brocas B81, B82 y maquina CNC.

Al realizar el procedimiento anteriormente descrito para una broca de 6 mm de diámetro, en la cual se varió el nivel de refrigerante, se pudo apreciar (Figura 12) que un nivel alto de refrigerante (B63-2), genera un aumento de potencia en el espectro desde los 3000 Hz en adelante sin ninguna componente en especial.

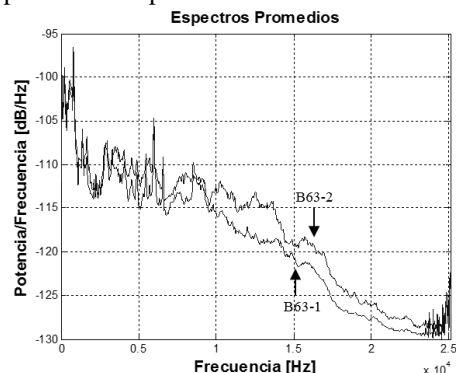


Fig. 12. Espectro promedio broca B63.

### 3.2.2 Análisis mediante espectrogramas

Se realizó utilizando una ventana de 0,2 [s], lo que equivale a 10240 datos, un traslape del 50% y el uso de 512 puntos para el cálculo de la transformada de Fourier discreta, lo que condujo a la generación de una resolución de 100 Hz. Este procedimiento permite visualizar las anomalías transitorias (aquellas presentadas durante un tiempo corto), para cada una de las brocas en algunos agujeros de interés.

En la Figura 13 se aprecia un espectrograma característico para un agujero realizado con una broca de 8 mm de diámetro en buenas condiciones, se observa que existen pocas variaciones respecto al tiempo, lo cual indica que el sonido presenta una relación baja con la profundidad del agujero. Por otra parte, en la Figura 14 se presenta el espectrograma para un agujero realizado con una broca desgastada, de 8 mm de diámetro; se observa que la potencia aumenta de manera progresiva en regiones más amplias del espectro, lo cual indica que es una característica valiosa para ser utilizada en la determinación del estado de la herramienta.

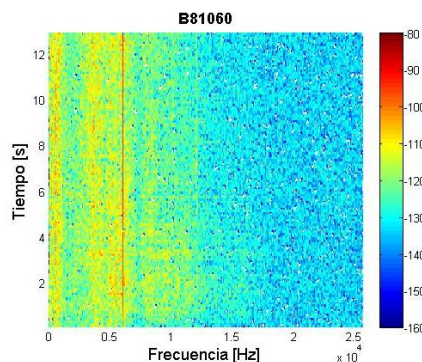


Fig. 13. Espectrograma de una broca de 8 mm en buenas condiciones.

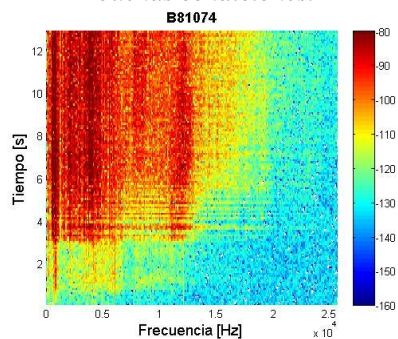


Fig. 14. Espectrograma de una broca de 8 mm desgastada

### 3.3 Análisis mediante la transformada Wavelet

La transformada Wavelet permite el análisis en el dominio del tiempo y la frecuencia de manera simultánea, mediante la descomposición de la señal

original en una serie de versiones trasladadas y escaladas de la señal original respecto a una wavelet madre, ver (García-Ugalde *et al.*, 2017). (Mannan *et al.*, 2000) utilizaron la descomposición wavelet multinivel para analizar el sonido generado por el proceso de torneado mediante la wavelet Symlet y lograron monitorear de manera efectiva el estado de la herramienta. (Velayudham *et al.*, 2005) utilizaron la descomposición en paquetes de wavelet para analizar la emisión acústica generada por el taladrado en un polímero, logrando detectar características que podrían ser empleadas para el monitoreo de la herramienta, sin embargo, cabe destacar que no mencionaron la wavelet madre empleada. (Patra, 2011) también utiliza la descomposición en paquetes de wavelet para analizar la emisión acústica generada en un proceso de taladrado y mediante redes neuronales logran monitorear el desgaste de la broca de manera efectiva, pero sin aclarar la wavelet madre empleada. Debido a que no existe un criterio generalizado para la selección de la wavelet madre se analizaron las señales adquiridas mediante una descomposición de cinco niveles, como se observa en la Figura 15, usando diferentes wavelets madres:

-Daubuchies: db3, db4 y db7.

-Dmeyer: dmey.

-Symlet: sym2 y sym6.

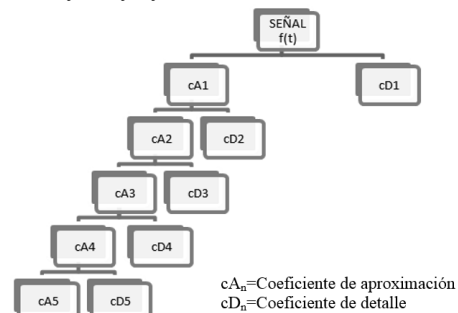


Fig. 15. Descomposición Wavelet multinivel.

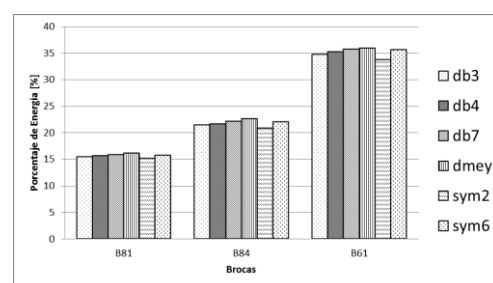


Fig. 16. Energía del coeficiente de aproximación  $cA5$ .

Posteriormente se realizó el cálculo del porcentaje de energía contenida en cada coeficiente mediante MATLAB y los resultados se aprecian en la Figura

16. Se observa de manera clara que la wavelet madre empleada en la descomposición tiene una influencia muy baja. Debido a la naturaleza aleatoria de la señal, se observó una baja influencia de la wavelet madre empleada, así que se optó por emplear la wavelet Daubuchies 4 (db4). Se calculó la energía promedio de los coeficientes para cada agujero y posteriormente se promediaron todos estos datos dando como resultado la Figura 17, en la que se observa la influencia del micrófono, en el nivel de energía correspondiente a cada coeficiente y la diferencia entre brocas de distinto diámetro, pero cuya señal fue adquirida con el mismo micrófono.

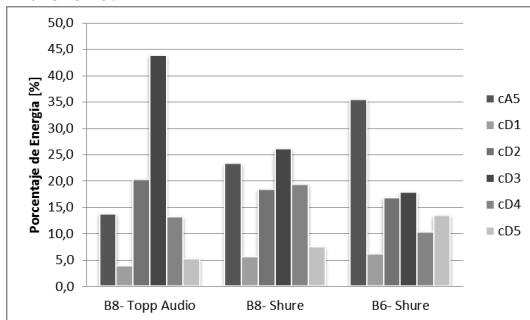


Fig. 17. Energía de los coeficientes usando la wavelet db4.

Se realizó el cálculo del valor cuadrático medio, para aquellos coeficientes que presentaban una mayor cantidad de energía mediante la reconstrucción de estos coeficientes, y como se puede observar de la Figura 18, estos presentan el comportamiento general de la señal original. En la Figura 19 se observa el comportamiento del valor cuadrático medio de varios coeficientes wavelets para el ensayo B63 (broca de 6 mm – ensayo 3), en la cual se varió el flujo de refrigerante, empezando con un flujo elevado y posteriormente un flujo normal. Se observa que el coeficiente de aproximación cA5 presenta una baja variación lo cual indica que no fue afectado por la variación del flujo de refrigerante, mientras que el coeficiente de detalle cD3 mantuvo el comportamiento de la señal original (Vrms).

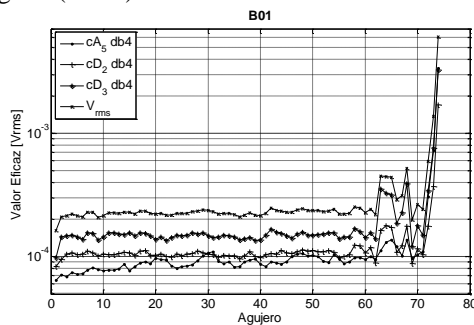


Fig. 18. Valor cuadrático medio de varios coeficientes wavelet.

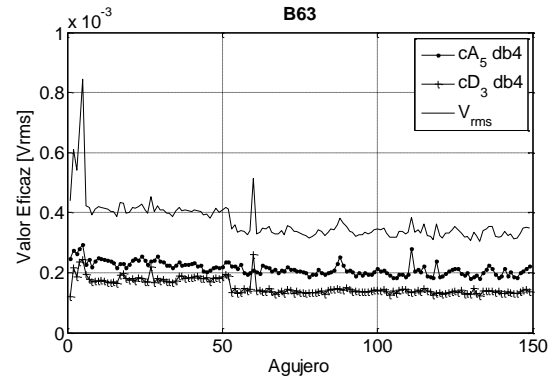


Fig. 19. Valor cuadrático medio de varios coeficientes wavelet.

El análisis de los coeficientes wavelet presenta la posibilidad de disminuir la influencia de algunas variables del proceso, como el flujo del refrigerante, cabe anotar que esto no se podría llevar a cabo mediante el análisis en frecuencia, ya que la influencia del nivel de refrigerante está distribuida en una gran región del espectro como se observó en la Figura 12, por lo tanto este análisis también presenta potencial para ser empleado en el monitoreo del estado de la herramienta de corte.

#### 4. CONCLUSIONES

Las técnicas de análisis utilizadas en la investigación y presentadas en este artículo, permiten plantear que:

- La señal acústica y la vida de la broca no guardan una relación estrecha durante la mayor parte del tiempo, es decir, monitoreando el sonido es posible conocer solo dos estados de la herramienta, o se encuentra en buenas condiciones o, por el contrario, está desgastada. Además, las señales se ven afectadas por las condiciones del proceso, como la pieza de trabajo, la dureza del material, la secuencia de taladrado y el nivel de refrigerante.
- El análisis del valor cuadrático medio del voltaje en función de la profundidad, presentó características valiosas que podrían ser empleadas como criterio para la detección de las anomalías que anteceden la falla de la herramienta de corte, por medio del establecimiento de un valor umbral.
- Los análisis estadísticos como asimetría y curtosis, presentaron un comportamiento independiente del desgaste de la herramienta de corte, mostrando valores altos cuando se presentaron anomalías de corta duración. Los



análisis de correlación y autocorrelación permitieron conocer y evidenciar la naturaleza aleatoria de la señal.

- La señal acústica generada por el proceso del taladrado posee un espectro característico distribuido en diferentes bandas de frecuencia y cuya forma está influenciada por las características del sensor.
- El análisis por espectrogramas de las bandas de frecuencia de 2000 Hz a 6000 Hz y alrededor de los 13 kHz, presenta potencial para ser empleado en la detección de la falla, ya que permitió observar claramente aumentos en la potencia al final de la vida de las herramientas.
- El análisis por la transformada Wavelet permite la extracción de coeficientes que presentan un comportamiento similar al de la señal original y otros coeficientes que no son afectados por variaciones externas (flujo de refrigerante). En el análisis, se presentó una baja influencia de la wavelet madre usada en la descomposición de las señales.
- *Prospectiva*: utilizar un micrófono único ha sido la estrategia predominante para captar el sonido en las investigaciones de monitoreo del desgaste de herramientas. Un solo micrófono captará el sonido de todo el entorno, de otras máquinas y los reflejos de los sonidos. La continuidad de este trabajo implicará una estrategia basada en arreglos de micrófonos tipo MEMS. La utilización de matrices de micrófonos múltiples, permitirá generar una imagen, en tiempo real, de los sonidos experimentados en un área. El perfeccionamiento y abaratamiento de los MEMS, indican una posibilidad práctica y económica para su utilización en trabajos de investigación posteriores. La tecnología MEMS ya ha sido evaluada y utilizada, por los autores, en otras investigaciones, ver (Gómez, 2013) y (Meneses, 2015).

## RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen a Franklin Sepúlveda y Cesar Duarte por sus valiosas contribuciones a este trabajo.

## REFERENCIAS

Boutros T. y Liang M. (2011). *Detection and diagnosis of bearing and cutting tool faults using hidden Markov models*. Mechanical

Systems and Signal Processing, **Vol.** 25, pp. 2102–2124.

García-Ugalde F., Pérez K., Reyes L. y Cedillo-Hernández M., (2017). *Una comparación de reducción de ruido en imágenes digitales utilizando un modelado estadístico de coeficientes wavelet y filtrado de Wiener*. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada **Vol.** 2, No. 30, pp. 46-55.

Gómez A., Archila J. y Meneses J. (2013). *Adquisición y tratamiento de señales de un acelerómetro triaxial mems, para la medición del desplazamiento de una extremidad inferior*. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada **Vol.** 1, No. 21, pp. 113-118.

Heinemann R. y Hinduja S. (2011). *A new strategy for tool condition monitoring of small diameter twist drills in deep-hole drilling*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, **Vol.** 52, pp. 69-76.

Jantunen E. (2002). *A summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, **Vol.** 42, pp. 997-1010.

Mannan, M. A., Kassim A. y Jing M. (2000). *Application of image and sound analysis techniques to monitor the condition of cutting tools*. Pattern Recognition Letters, **Vol.** 21, pp. 969-979.

Meneses J., García, J. y Ferreira, D. (2015). *Acelerómetros MEMS en el desarrollo de pozos y campos petroleros inteligentes*, Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada **Vol.** 2 No. 26, pp. 128-135.

Patra K. (2011). *Acoustic emission based tool condition monitoring system in drilling*. Proceedings of the World Congress on Engineering, **Vol.** III.

Rafezi H., Avbari J. y Behzad M. (2012). *Tool Condition Monitoring based on sound and vibration analysis and wavelet packet decomposition*. 8th International Symposium on Mechatronics and its Applications.

Rajesh S. y Marimuthu K. (2011). *On-line Drill Wear Monitoring System through Cutting Current Signals by using Virtual Instrumentation*. European Journal of Scientific Research, **Vol.** 56, No. 1, pp. 51-60.

Velayudham A., Krishnamurthy R. y Soundarapandian T. (2005). *Acoustic emission based drill condition monitoring during drilling of glass/phenolic polymeric composite using wavelet packet transform*.

Materials Science and Engineering, **Vol.** 412,  
pp. 141–145.