



Universidad Autónoma de Querétaro
 Facultad de Ingeniería
 Maestría de Instrumentación y Control

**DETECCIÓN DE RUPTURA EN HERRAMIENTAS
 DE CORTE EN EL PROCESO DE TALADRADO**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ciencias
 Línea terminal en Instrumentación y Control Automático

Presenta:

Wbaldo Leal Tafolla

Dirigido por:

Dr. René de Jesús Romero Troncoso

SINODALES

Dr. René de Jesús Romero Troncoso
 Presidente

Dr. Gilberto Herrera Ruiz
 Secretario

Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa
 Vocal

M.I. Pedro Daniel Alaniz Lumbreras
 Suplente

M.I. Luis Alfonso Franco Gasca
 Suplente

M.I. Gerardo René Serrano Gutiérrez
 Director de la Facultad de Ingeniería

Dr. Sergio Quesada Aldana
 Director de Investigación y
 Posgrado

Centro Universitario
 Querétaro, Qro. Agosto de 2004
 México

BIBLIOTECA CENTRAL UAO

No. Adm. H69607

No. Titulo _____

Clas TS

621-80287

L435d

Ej. 1

RESUMEN

Es bien conocido que el monitoreo en-línea de las condiciones de la herramienta es de gran importancia en la manufactura moderna. Para prevenir posibles daños en la pieza de trabajo y en la herramienta de la máquina, se requieren técnicas de monitoreo confiables que den una respuesta rápida ante fallas inesperadas también.

Esta tesis presenta los métodos para el monitoreo, análisis de señales y técnicas de diagnóstico para el desgaste de herramientas en el Taladrado, los cuales han sido probados. Varias técnicas han sido desarrolladas para la detección del desgaste de la herramienta; las técnicas más comunes reportadas en el ambiente de maquinado industrial son la fuerza, la emisión acústica y la corriente eléctrica.

Durante el proceso de corte, la corriente del motor del husillo está relacionado con las condiciones de la herramienta. Existe menos consumo de corriente, para un mismo avance, cuando se usa una herramienta afilada comparada con una desgastada, esta variación puede ser explotada para monitorear en-línea la herramienta.

El análisis espectral y el método de series de tiempo son las técnicas de procesamiento más comunes para el monitoreo de la herramienta. Los métodos mencionados tienen una buena solución solamente en el dominio de la frecuencia y una pobre solución en el dominio del tiempo de manera que pierde algunas señales de información en el dominio del tiempo. Recientemente, La transformada de ondoletas propuesta, es una nueva herramienta para el análisis y procesamiento de las señales. La transformada de ondoletas tiene una buena solución en el dominio tiempo-frecuencia de manera que puede extraer mas información en el dominio del tiempo a diferentes bandas de frecuencia.

El taladrado es una de las operaciones de maquinado mas fundamentales. Hay muchos problemas prácticos en el taladrado, uno de los más críticos es el desgaste de la broca. Sólo un número limitado de herramientas para el diagnóstico automático han sido desarrollados para determinar las condiciones de la herramienta en el taladrado. La herramienta matemática que usamos, después de realizar el análisis de señal, es la Simetría la cual demuestra ser suficiente y precisa para el diagnostico de la condición de la herramienta en el proceso de taladrado.

Palabras clave: Desgaste de herramienta, Taladrado, Métodos de monitoreo, Análisis de señal, Herramientas de diagnóstico.

SUMMARY

It is well known that on-line tool condition monitoring has great significance in modern manufacturing process. To prevent possible damages to the work piece and machine tool, reliable techniques are required for providing a rapid response to an unexpected tool failure.

This paper presents a summary of the monitoring methods, signal analysis and diagnostic techniques for tool wear and failure monitoring in drilling that have been tested. Several techniques have been developed to the detection of tool wear condition; the most common techniques reported in the industrial machining environment are force, acoustic emission and current.

During the cutting processes, spindle motor current is related to the tool condition. Less power is consumed, for a same tool feed, when a sharp tool is used compared to a worn tool. This variance can be exploited for on-line tool breakage monitoring.

Spectral analysis and time series methods are the most commonly used processing techniques in tool condition monitoring. But the above methods, are such that they have a good solution only in frequency domain and a poor solution in time domain so that some time domain signal information is lost. Recently, the wavelet transform proposed is a significant new tool in signal analysis and processing. Wavelet transform has a good solution in the time-frequency domain so that it can extract more information in the time domain at different frequency bands.

Drilling is one of the most fundamental machining operations. There are many practical problems in drilling. One of the most crucial issues is wear in drill. Only a limited number of automatic diagnostic tools have been developed for diagnosis of the condition of the tool in drilling. The applied mathematical tool used, after the signal analysis, is the Symmetry because it is sufficient and precise for tool condition diagnostic in drilling.

Key words: Tool wear, Drilling, Monitoring methods, Signal analysis, Diagnostic tools.

AGRADECIMIENTOS

A **Dios** por ser mi guía y darme salud e inteligencia.

A **mis padres** Javier y Virginia con profundo amor y agradecimiento por su apoyo incondicional. Que con sabiduría, amor, unión y maravilloso ejemplo de lucha incansable han cultivado en mi deseo de superación constante.

A **mis hermanos** Javier, Israel, Alfredo, Fidelmar, Ulises y Mireya a quienes llevo en lo más profundo de mi corazón.

Al **Dr. René Romero Troncoso** por su asesoría y apoyo en la realización del presente trabajo.

Al **Dr. Gilberto Herrera Ruiz** por su orientación y enseñanza, que me han ayudado para concluir con mis estudios de Posgrado.

INDICE

	Página
RESUMEN	i
SUMMARY	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE	iv
INDICE DE FIGURAS	vii
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Métodos de monitoreo	3
1.3 Objetivos	5
1.4 Justificación	5
1.4.1 Costo de fallas	6
1.4.2 Beneficios	6
1.5 Planteamiento General	7
II. REVISIÓN DE LITERATURA	8
2.1 Métodos de medición	8
2.2 Torque, fuerzas laterales y fuerzas de avance	8
2.3 Vibración y sonido	9

2.4	Emisión acústica y vibración ultrasónica	10
2.5	Corriente del husillo y corriente del controlador de avance	11
2.6	Corriente de los servo amplificadores	12
2.7	Monitoreo y procesamiento de señales usando ondoletas	13
III.	METODOLOGÍA	14
3.1	Análisis de señales	14
3.1.1	Señal en el dominio del tiempo	14
3.1.2	Promedio móvil autoregresivo	17
3.1.3	La Transformada de Fourier	17
3.1.4	La Transformada de Fourier Discreta	18
3.1.5	La Transformada Rápida de Fourier	19
3.1.6	La Transformada de Fourier con Ventana	21
3.1.7	La Transformada de Ondoletas	22
3.1.8	La Transformada de Ondoleta Discreta	26
3.1.9	Ejemplos de la Transformada de Fourier y la Transformada de Ondoleta	28
3.2	Instrumentación	32
3.2.1	Esquema del modelo físico del taladrado	32
3.2.2	Adquisición de datos	36
3.2.3	Amplificador del husillo	38
3.2.4	Medición de señales reales	40
3.3	Procesamiento de señales	46
3.3.1	Señales	46
3.4	Asimetría como clasificador	48
3.4.1	Detección de daño en herramienta	48
3.4.2	Calculo de Asimetría	51

IV. RESULTADOS Y DISCUSION	57
4.1 Resultados	57
4.2 Discusión	59
4.3 Conclusiones	60
LITERATURA CITADA	63
APENDICES	66
A Programa de Matlab para filtrar las señales muestreadas	66
B Programa de Matlab para seleccionar el rango a analizar de la señal del taladrado	67
C Programa de Matlab para calcular la ondoleta de la señal monitoreada	69
D Programa de Matlab para calcular la Asimetría de la señal del Taladrado	70
E Programa de Matlab para graficar la Ondoleta Madre	71
F Programa de Matlab para graficar ejemplos con las herramientas matemáticas	71
E Publicación 1 Publicación 2	74

INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1.1	Línea automatizada para el maquinado de componentes de Flechas Cardan	1
1.2	Línea final de Flechas Cardan donde se refleja la calidad de los procesos anteriores	2
1.3	Proceso de Taladrado	4
1.4	Modelo de proceso productivo orientado al cliente	5
3.1	Ondoleta Madre Gaussiana	25
3.2	Ejemplo de Ondoleta Madre	25
3.3	Transformada de Fourier de la señal en el tiempo $f(u)$	28
3.4	Transformada de Fourier con ventana de $f(u)$	29
3.5	Coefficientes de Aproximación y Detalle de la Transformada de Ondoletas de $f(u)$	29
3.6	Transformada de Fourier de la señal ruidosa en el tiempo $f(u)$	30
3.7	Coefficientes de Aproximación y Detalle de la Transformada de Ondoletas de $f(u)$ ruidosa	30

3.8	Transformada de Fourier con ventana de la señal en el tiempo ruidosa $f(u)$	31
3.9	Geometría de la broca	32
3.10	Dirección de las fuerzas en el proceso de taladrado	34
3.11	Adquisición de las señales del taladro	37
3.12	Equipo usado para la adquisición de las señales	37
3.13	Controlador Safronics VG10	38
3.14	Conexiones del Controlador del Husillo en Modo Torque	39
3.15	Yugo deslizante usado para las pruebas	40
3.16	Broca Kennametal 4440301059 usada para las pruebas	41
3.17	Flujo de etapas para el desarrollo de los experimentos en el Taladro	42
3.18	Señal de una broca nueva	43
3.19	Señal de una broca dañada en 0.42 plg	44
3.20	Señal de una broca dañada en 1.76 plg	44
3.21	Señal de una broca nueva ya filtrada	46

3.22	Señal de una broca con daño de 0.42 plg	47
3.23	Señal de una broca con daño de 1.76 plg	47
3.24	Modelo para la detección de desgaste de la herramienta por Asimetría	48
3.25	Dos pulsos detectados antes de la Transformación de Ondoleta	49
3.26	Cuatro niveles de ondoletas aplicados a la señal de la broca nueva	50
3.27	Cuatro niveles de ondoletas aplicados a la señal de la broca con ruptura de 0.42 plg	51
3.28	Cuatro niveles de ondoletas aplicados a la señal de la broca con ruptura de 1.76 plg	52
3.29	Señal después de la transformación de Ondoleta	53
3.30	Gráfica con cada componente del valor de Asimetría	54
3.31	Asimetría de 0.5 máximo para una herramienta nueva	55
3.32	Asimetría de 1.3 máximo para una herramienta dañada 0.42 pulgadas	55
3.33	Asimetría de 7.9 máximo para una herramienta dañada 1.76	56

pulgadas

4.1 Comportamiento del valor de Asimetría

61

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En la industria metal-mecánica, el consumo de herramientas de corte, después de la materia prima, representa el mayor costo en el proceso productivo y detectar su ruptura antes de que afecte la calidad o dañe parte de la máquina, mejora los resultados del proceso de producción. Una buena selección de la herramienta de corte permite mejorar el número de piezas por unidad de tiempo y con mejor calidad al evitar paros en el proceso productivo por fallas en la herramienta y sus consecuentes daños en la maquinaria de acuerdo a estudios en Cardanes, S.A. de C.V. El rompimiento de la herramienta, el desgaste (vida útil) y colisiones son las causas más frecuentes de paros en los procesos de producción en máquinas herramientas. De acuerdo a un análisis realizado en "SIEM 2000 Report", Cardanes, S.A. de C.V. (2000), las rupturas de la herramienta son causadas por: errores de dimensión en la forja o fundición (3%), errores de programación (13%), herramienta inadecuada (18%), errores del operador (20%), calibración de la herramienta por cambios de modelo (21%) y fallas en sistema eléctrico del CNC (25%); por lo que debemos atacar y prever éstas últimas.

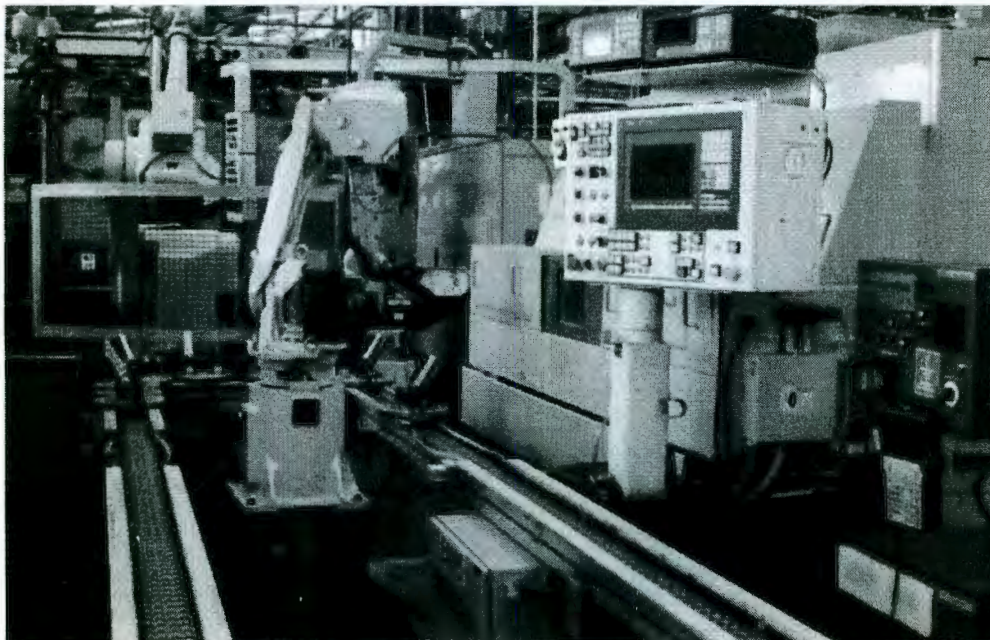


Fig. 1.1 Línea automatizada para el maquinado de componentes de Flechas Cardan

Cardanes gasta 32,000 USD por mes en herramientas de corte, y el costo puede ser reducido monitoreando el proceso de maquinado y realizando acciones correctivas antes de que afecte el proceso productivo.

Al igual que en la UAQ , el desgaste de la herramienta y el monitoreo de fallas ha sido estudiado en un gran número de organizaciones de investigación, algunas de ellas mencionadas en el capítulo II.

La razón del interés es que el monitoreo de las condiciones de la herramienta es considerado importante por las razones que se mencionan.



Fig 1.2 Línea final de flechas Cardan donde se refleja la calidad de los procesos anteriores

- Para la automatización de la producción es importante tener un método para monitorear el desgaste de la herramienta y detectar su ruptura.
- La ruptura de la herramienta afecta la calidad del microacabado y las dimensiones de las piezas que son maquinadas.
- La vida de la herramienta puede ser determinada monitoreando su ruptura o pueden hacerse predicciones estadísticas pero es más eficiente el monitoreo en línea durante el proceso de maquinado.

- por las variaciones en la vida de la herramienta. Actualmente la vida de la herramienta se determina en base a un estimado conservador de ciclos de trabajo, el cual no toma en cuenta fallas repentinas y esto lleva a realizar cambios innecesarios de herramienta y disminución del tiempo productivo.
- Como consecuencia de lo anterior, en el control de la producción automatizada es importante considerar el monitoreo de ruptura de la herramienta.

Los costos involucrados en la manufactura moderna son muy altos por las altas inversiones en el equipo de manufactura por lo que es del interés de la industria tener equipos en optimas condiciones incluyendo una producción automatizada con alta confiabilidad.

1.2 Métodos de monitoreo

Principalmente, los métodos de monitoreo de ruptura de la herramienta pueden ser clasificados en dos categorías: métodos directos e indirectos. Con los métodos directos es posible determinar la vida de la herramienta lo cual significa que estos métodos realmente miden la ruptura como tal. Sin embargo, muchos métodos directos, tales tales como la inspección visual o la visión por computadora, aún no ofrecen una solución económica ni técnica atractiva.

Hay diferencias en cómo ciertos métodos de monitoreo trabajan dependiendo de su uso para monitorear la vida de la herramienta. Algunos métodos son más efectivos para la detección de una falla repentina y algunos son más apropiados para monitorear el desgaste de la herramienta. A este respecto hay más diferencia aún en los métodos disponibles para el análisis de señales.

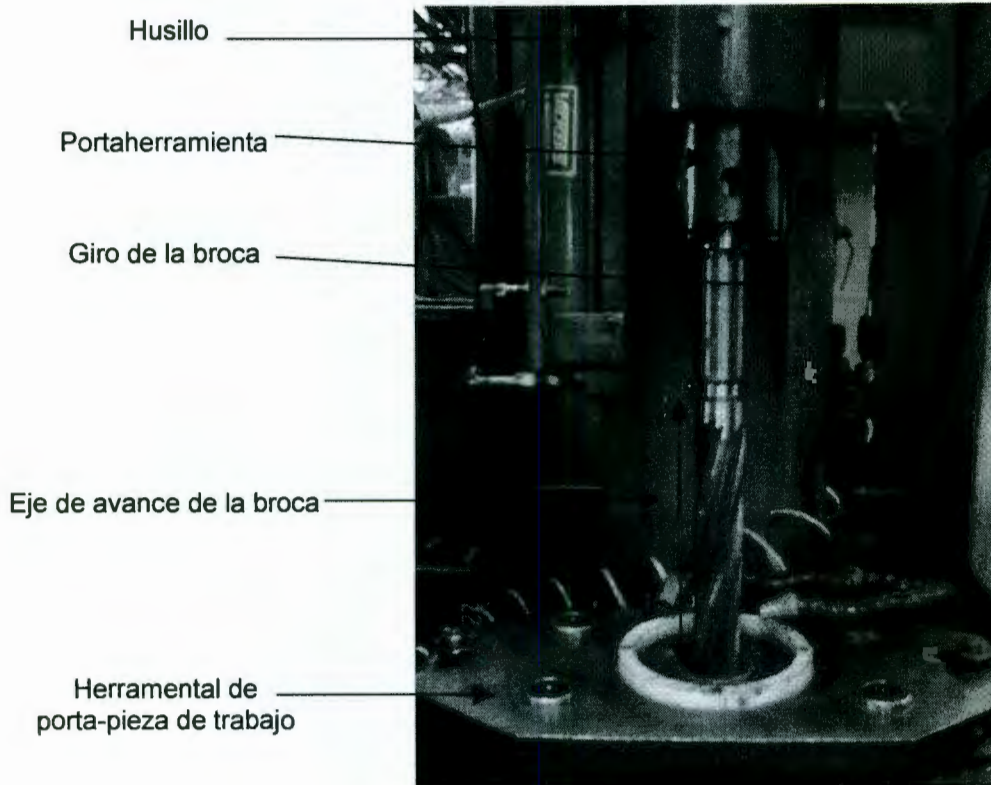


Fig. 1.3 Proceso de taladrado

El desgaste de la herramienta en el taladrado es un proceso progresivo debido al contacto continuo y a las elevadas temperaturas en la pieza y la herramienta, Thangaraj A., Wright P.K. (1998). Sin embargo, bajo condiciones de trabajo continuo las fallas de la herramienta en el taladrado es un proceso estocástico. Las razones para la variación en la vida de la herramienta son la heterogeneidad en la pieza de trabajo, las irregularidades en el flujo del líquido refrigerante y la asimetría generada en el rectificado de los filos de corte de la herramienta.

Similarmente, como en el caso de los métodos de medición, hay varias técnicas de análisis de señal que han sido probadas para el monitoreo del desgaste de la herramienta. En el taladrado hay muchas variaciones tales como realizar ciclos usando diferentes parámetros de proceso, de manera que el análisis de señal es realmente necesario a fin de separar la información requerida del resto del ruido.

1.3 Objetivos

Objetivo general

Implementación de un sistema detector de ruptura en herramientas de corte en taladros a través del monitoreo de corriente eléctrica del husillo.

Actividades a realizar:

- 1 Estado del arte en detección de fallas en herramientas de corte.
- 2 Monitoreo de la señal de corriente eléctrica.
- 3 Procesamiento con ondas y análisis de las señales.
- 4 Detección de ruptura usando el algoritmo de asimetría

1.4 Justificación

Los procesos de maquinado actuales tienen la particularidad de que son “Justo a tiempo” y “pieza a pieza” lo que significa que existe un mínimo de inventario (Fig. 1.4) y cualquier paro en el proceso comprometerá la entrega al cliente, de aquí la importancia de tener procesos, máquinas y herramientas confiables.

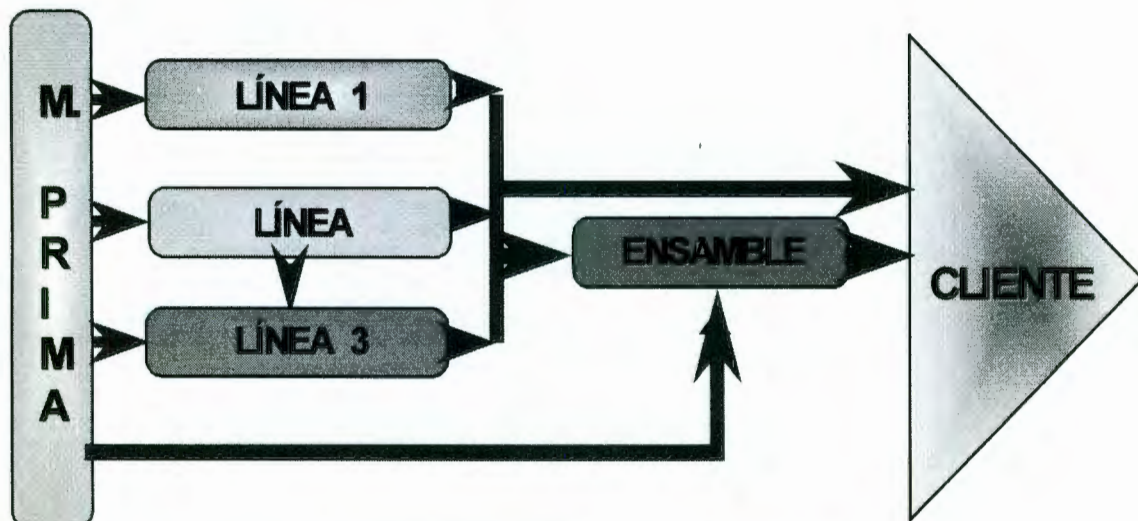


Fig. 1.4 Modelo de proceso productivo en línea con el cliente

Toda industria tiene como clientes finales al usuario del producto y accionista. El usuario del producto requiere calidad, costo y tiempo de entrega; el accionista, requiere que su inversión crezca al tener excelentes resultados y utilidades financieras. Lo anterior se logra siendo una industria competitiva, para ello se eficientan los procesos productivos, con el fin de elevar la productividad, mejorar la calidad y reducir los gastos.

En la industria metal-mecánica, las herramientas de corte son parte esencial para el logro de los objetivos anteriores. Una buena selección de la herramienta de corte y dentro de sus condiciones de velocidad y avance, permitirá mejorar el número de piezas por hora y con mejor calidad, al evitar paros en el proceso productivo por fallas en la herramienta y sus consecuentes daños en la maquinaria. Esto da como resultado una mayor venta y por lo tanto más utilidades.

1.4.1 Costo de fallas

El rompimiento de la herramienta, el desgaste de la herramienta (vida) y colisiones son frecuentemente la causa de paros de producción en máquinas herramienta. De acuerdo a un análisis hecho por la universidad de Munich, en Europa, el promedio de los daños causados por rupturas es de aproximadamente 12 000 USD, con daños secuenciales no incluidos.

1.4.2 Beneficios

En este trabajo, se detectan fallas de la herramienta de corte en el proceso de taladrado mediante la lectura de las corrientes eléctricas existentes en el husillo de la máquina y el procesamiento de las mismas a través de algunas técnicas matemáticas existentes.

La detección de fallas en la herramienta de corte mediante el análisis de fuerzas que se presentan en el desbaste o remoción de material, es una forma práctica de lograr dicha detección, dada la física misma presente en tal proceso. Todas las variables íntimamente ligadas con dichas fuerzas como lo son torques ejercidos o corrientes eléctricas demandadas por el husillo en el momento del corte de material, reflejan el comportamiento que están teniendo tales fuerzas, y por ende acceder de manera indirecta a la detección de estados de falla.

1.5 Planteamiento general

El presente trabajo se enfoca a la implementación de un equipo para la detección de fallas en la herramientas de corte en taladros y el propósito es obtener las señales y desarrollar una herramienta capaz de reconocer la ruptura de la herramienta en el taladrado. En las pruebas la herramienta usada ha sido grabada usando un sistema de adquisición de National Instruments.

El sistema detector de ruptura de herramientas de corte, por diseñar, procesa la corriente eléctrica del husillo para en base a su comportamiento hacer la detección. Este sistema consta de tres etapas:

- i Monitoreo de la señal de corriente eléctrica.
- ii Procesamiento y análisis de la señal.
- iii Detección de las condiciones de fallas de la herramienta.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Métodos de medición.

El torque, la simetría de la retroalimentación y la fuerza de avance con la medición del esfuerzo en la máquina, son todas mediciones relacionadas con la fuerza de corte.

La corriente del controlador de avance y del motor del husillo están íntimamente relacionadas a las fuerzas, ellas también miden las fuerzas de corte aunque a través de una larga cadena de medición donde otros factores tienen influencia en las señales.

Otro método que podemos usar para evaluar el esfuerzo de corte es la vibración, cuya medición puede ser: la vibración en la máquina, el sonido, la vibración ultrasónica y la emisión acústica. Aunque el intervalo de frecuencia en cada una de éstas difiere y, en adición a eso, el sonido es una vibración que se transmite por el aire cuando todas las otras son vibraciones mecánicas de la estructura.

La gama de frecuencia en las mediciones de vibración está típicamente entre 1 Hz y 10 kHz (ó 16 ó 20 kHz); en la medición del sonido el intervalo es de 20 Hz a 20 kHz, lo cual es el intervalo en el que una persona joven puede oír; en la vibración ultrasónica la gama de frecuencia es de 20kHz a 80 kHz, Hayashi S.R., Thomas C.E. y Wildes D.G. (1998); y la emisión acústica ultrasónica principia donde la vibración ultrasónica termina y hasta 1 MHz.

2.2 Torque, fuerzas laterales y fuerza de avance.

Es muy lógico monitorear las fuerzas en un proceso de corte a fin de seguir el desarrollo del desgaste de la herramienta de corte. Es generalmente conocido que la fuerza de corte se incrementa tanto como se incrementa el desgaste, Lin

S.C. y Ting C.J. (1995). Esto se debe al incremento de fricción entre la herramienta y la pieza de trabajo. En el taladrado es posible monitorear el torque, las fuerzas laterales que afectan la pieza y la fuerza de avance (eje x, vertical). La idea de monitorear el torque y la fuerza de avance es muy clara, ya que se espera que cambien tal como el desgaste gradual de la herramienta..

La variación en la vida de la broca es significativamente influenciada por la dureza de la pieza de trabajo. En una operación industrial, las brocas pueden fallar muy pronto o después de un largo tiempo, dependiendo de la ocurrencia de las piezas de trabajo con una alta dureza. Esto puede explicar la gran variación en la vida de la herramienta que se observa en la industria. La dureza de la pieza de trabajo también afecta la amplitud de la fuerza y el torque que aparecen en la operación del taladrado.

2.3 Vibración y sonido.

La vibración es ampliamente usada para monitorear las condiciones de la maquinaria rotativa. Sin embargo la vibración no ha sido usada con la misma frecuencia en el monitoreo de las condiciones de la herramienta, probablemente por ser un método mucho más sensible al ruido el cual está presente en el proceso de corte. Las ventajas de la medición de la vibración incluyen lo fácil de su implementación y al hecho de que no requiere de modificar la herramienta de la máquina o el instrumental de la pieza de trabajo, El-Wardany T.I., Gao D. y Elbestawi M.A. (1996). Sin embargo, las desventajas reportadas en la literatura incluyen la dependencia de las señales de vibración por el material de la pieza de trabajo, las condiciones de corte y la estructura de la máquina. La vibración es medida en la dirección transversal y axial. Las señales de vibración son consideradas por contener información confiable para monitorear el desgaste y rompimiento de la herramienta en el taladro por las siguientes razones: la longitud de la onda de vibración en el modo axial y transversal no cambia durante el taladrado, esto mantiene casi constante la frecuencia de la vibración. La frecuencia natural de los modos axial y transversal del sistema "pieza de trabajo-

broca" son básicamente insensitivos al diámetro transversal, esto simplifica el monitoreo para una amplia gama de tamaños de brocas. La vibración en las direcciones Y y Z son influenciadas por el torque (en el husillo) y la fuerza de avance de la herramienta, las cuales son las mayores fuentes de excitación en el taladrado.

En teoría, podría esperarse que las mediciones del sonido dieran la misma información que puede ser detectada usando las mediciones de vibración porque en los límites estructurales, la vibración mecánica de la estructura o el contacto broca/portapieza es parcialmente transformada a una vibración aerotransferida, lo cual se traduce en sonido. Sin embargo varios factores afectan la transferencia de la vibración mecánica y como cambia a diferentes frecuencias. También existe gran diferencia por la influencia de disturbios externos comparados en las mediciones de vibración y sonido. Las mediciones de sonido son más vulnerables que las de vibración pero al mismo tiempo debemos recordar que los operadores de la maquinaria confían muy a menudo en lo que escuchan para determinar cuando la herramienta está desgastada o no. Las mediciones de vibración y sonido, Jantunen E. y Jokinen H. (1996), han sido probadas y comparadas en el taladrado, resultando que la vibración fue el método más efectivo de los dos. Dada la geometría de la broca, la señal de vibración filtrada ha dado más clara indicación de las fallas y del desgaste de la herramienta, que la señal de la fuerza de avance.

2.4 Emisión acústica y vibración ultrasónica.

La vibración ultrasónica se usa para detectar el rompimiento de la herramienta en el intervalo de 20 a 80 kHz. La emisión acústica ultrasónica tiene el inconveniente de sufrir severa atenuación causada por uniones con pernos comúnmente encontradas en la estructura de la máquina. La frecuencia de más baja señal usada para el análisis de vibración ultrasónica no sufre tal severa atenuación o distorsión, de manera que el transductor puede ser colocado lejos de

la herramienta o la pieza de trabajo, pero desafortunadamente es mucho más sensitivo las variaciones de la máquina y portaherramienta. Dado que el modo estructural cambia de forma compleja con la máquina en movimiento, carga, temperatura y portaherramienta, este método necesita de su calibración empírica cada vez que el proceso cambia. En el método de emisión acústica se usa un sensor con una respuesta a la frecuencia no-lineal es considerado un sensor de emisión acústica. Este mismo sensor ha sido usado para mediciones en el intervalo de frecuencia de 1 a 5 kHz lo cual normalmente es considerado vibración mecánica.

La emisión acústica es un fenómeno que ocurre debido a las ondas de tensión generadas cuando hay una liberación rápida de energía en un material o su superficie.

2.5 Corriente del motor del husillo y corriente del controlador de avance

La corriente del motor del husillo es en principio una medición de las mismas características que el torque, ambas se relacionan con la cantidad de potencia usada en el proceso de corte y ambas también nos dan información de la dinámica del corte. El torque es un método más sensitivo para la medición que la corriente del husillo, dado que el sensor de torque es colocado mas cerca de la herramienta de corte y la señal no es tan ruidosa. Sin embargo, la medición del torque es más complicada que la medición de la corriente del motor del husillo y por lo tanto la medición de la corriente ha sido ampliamente probada y usada, Jantunen E., Jokinen H. (1996) y Li X. (1999).

Similarmente, como la corriente del husillo corresponde al torque, la corriente del controlador de avance corresponde a la medición de la fuerza de avance. Otra vez, hay diferencias similares en la sensitividad de los métodos tal y como en el caso anterior , Jantunen E., Jokinen H. (1996) y Li X. (1999).

Típicamente, un sensor de esfuerzos, usado para medir la fuerza de avance, es mejor que el sensor de la corriente de motor del husillo para diagnosticar desgaste de la herramienta.

Resultados reportados, Routio M., Saynatjoki M. (1995), para la corriente del controlador de avance y la potencia del husillo junto con la fuerza de avance y el torque son muy similares.

2.6 Corriente de los servoamplificadores

Relevante aportación a los sistemas de detección de fallas en herramientas de corte fue el trabajo desarrollado en la UAQ, Romero T. Rene, Herrera R. Gilberto (2004), donde se implementa un método sin sensores, para obtener las señales de corte, a partir de la corriente proporcionada directamente por los servoamplificadores. La principal ventaja de este método es su bajo costo, haciendo uso de las señales que ya se encuentran disponibles. El sistema está formado por tres bloques funcionales: sensado de la corriente y acondicionador, adquisición de datos y procesamiento de señales. El acondicionador de la señal se usó para extraer la señal de la fuerza de corte a partir de la corriente monitoreada y para ello se usó un filtro analógico. La parte de adquisición de datos se utilizó para digitalizar la señal de la fuerza de corte para su procesamiento.

Las estructuras digitales para la realización de los algoritmos numéricos se desarrolló en circuitos VLSI (Very Large Scale Integration, integración de muy alta escala) con apoyo del lenguaje VHDL (Very high-speed integrated circuit Hardware Description Language). Los algoritmos aplicados fueron: Fuerza resultante a partir de las fuerzas de corte en los ejes X y Y, el cálculo de la transformada de ondas y el cálculo de la asimetría de los datos comprimidos para entregar un solo valor con la estimación del estado de la herramienta de corte.

2.7 Monitoreo y procesamiento de señales usando ondoletas

Referencia importante para el presente trabajo de Tesis es la investigación desarrollada para el monitoreo y procesamiento de señales por Herrera Ruiz Gilberto et al (1996). Aquí se expuso que dado que el proceso de corte en una fresa es cíclico, es presumible la utilización de la Transformada de Fourier en el procesamiento de la señales de fuerza involucradas en el proceso de corte. Una limitación de este tipo de transformación es que en ciertas situaciones no es posible identificar el tiempo en que ocurre la información que nos proporciona el análisis en el dominio de la frecuencia. Por ejemplo, suponiendo que se detecta en el dominio de la frecuencia, un problema con una fresa de varios insertos y se rompe uno de ellos, por si sola la transformada no nos dice cual sería el inserto roto (dentificación del problema en el dominio del tiempo), esta información esta disponible en el análisis de fase y en ciertos casos no es tan sencillo dicho análisis pero ayuda a evaluar la herramienta rota. Como alternativa se puede usar una versión modificada de la transformación tradicional de Fourier, que consiste en seccionar la información y procesarla por etapas, dando lugar a una transformación en dos dominios combinados (tiempo y frecuencia), a esta transformación se le denomina Transformada de Fourier de Tiempos Cortos (Short Time Fourier Transform, STFT).

Existe otra transformación que a la vez maneja los dominios del tiempo y frecuencia (se dispone de información que ocurre en cierto tiempo y a cierta frecuencia) con aplicaciones en procesamiento y compresión de imágenes, análisis de voz, etc. Esta transformación recibe el nombre Ondoleta (Wavelet). La transformación de ondoleta tiene propiedades en ambos dominios (tiempo y frecuencia). Las familias de funciones que permiten la transformación pueden ser consideradas como filtros pasa-banda que dependen de parámetros de escalamiento o dilatación y traslación. Lo importante de las ondoletas es que nos determinan la forma de la señal.

III. METODOLOGÍA

3.1 - Análisis de señales

El método usado para el análisis de las señales es importante. Algunos investigadores piensan que si la señal medida es aceptable entonces puede ser posible solucionar todo con una herramienta de diagnóstico bien seleccionada. Desafortunadamente este no es el caso. El diagnóstico siempre necesita estar basado en información significativa y confiable, y en esto es donde ayuda el análisis de señales generando información efectiva como base para el diagnóstico.

El rol del análisis de señal puede ser descrito como una herramienta que filtra la información significativa del total de la información. En algunos casos el dilema es que métodos muy sofisticados necesitan muchas muestras de señales y esto toma tiempo para su adquisición y luego para el desarrollo del algoritmo matemático.

Los resultados con una función de análisis sofisticado, están influenciadas por el proceso de corte, por ejemplo por el material de la pieza de trabajo, por el tipo de herramienta, el avance y la velocidad de corte, los cuales hacen el diagnóstico más complicado. Por otro lado, métodos muy simples son rápidos y a menudo no tan sensibles a los cambios en las condiciones de corte, desafortunadamente, al mismo tiempo no tan sensibles al desgaste de la herramienta.

3.1.1 - Señal en el dominio del tiempo

La señal en el dominio del tiempo no da mucha información como tal, o al menos lleva mucho tiempo observarla en forma gráfica, por ejemplo con un osciloscopio, König W., Christoffel K. (1990). La evaluación de los cambios, midiendo solamente la amplitud de la señal es muy complicada, por lo que se usa un voltímetro-RMS, pero esto no permite medir contribuciones individuales. Usualmente ciertos parámetros

estadísticos tales como la raíz media cuadrática (RMS), la media aritmética y la desviación estándar, el máximo y el mínimo, son calculados y usados para comparación y diagnóstico pero depende mucho de un análisis de sensibilidad de la medición.

Con casi todas las señales medidas el parámetro más común que se usa es el valor RMS, el cual actualmente es el valor que se ve si la señal es dibujada con un graficador o en un medidor de voltaje. El valor RMS contiene toda la energía en la señal y por lo tanto también todo el ruido y todos los elementos que dependen del proceso de corte. Por lo tanto, no es el parámetro más efectivo pero ha conservado su lugar porque es muy fácil de generar y entender. En pruebas realizadas, ningún cambio significativo fue encontrado en la media y la varianza de la señal del sensor. Por lo tanto se concluye que las señales de fuerza del sensor en el dominio del tiempo no muestran ninguna correlación visible con el desgaste de la broca.

Debido a la gran variación en las señales medidas, dado que el proceso es dinámico; los valores promedio para periodos de prueba largos son a menudo usados en estudios estadísticos. Cuando no se tiene un proceso bien controlado, la principal causa de falla no estaba relacionada al desgaste de la herramienta, mas bien la broca no soporta la carga y se rompe.

También una mezcla de parámetros estadísticos es usado, Ramamurthi K., Hough Jr. .C.L. (1993). Para la corriente del motor del husillo, hasta ahora, el uso de RMS ha sido justificado de la siguiente manera. La energía de baja frecuencia de la corriente del motor del husillo es directamente proporcional al torque de corte generado por la herramienta sobre la pieza de trabajo. Tanto como se desgasta la herramienta, el torque requerido se incrementa y correspondientemente la corriente del motor del husillo también se incrementa. El valor RMS de la corriente del motor del husillo viene a ser una característica considerable para predecir el desgaste. Adicionalmente para el valor RMS, el cambio en el valor RMS con respecto al primer barrenado de la broca, es

también una buena característica, dado que nos indica en el tiempo la tendencia del torque de corte.

Hay una variación en que también el desgaste de la herramienta es observado en los diferentes intervalos de frecuencia, aunque todo el tiempo hay un incremento en el porcentaje del valor RMS. Los valores máximos estables, son usados para la fuerza de avance, el torque, la corriente del husillo y el drive de avance de la herramienta, Routio M., Saynatjoki M. (1995). En el caso de la potencia del husillo y la corriente del motor del eje-Z (avance de la broca), los valores en la medición representan la diferencia entre el corte y el movimiento en vacío de la herramienta para la frecuencia rotacional correspondiente.

Un método adicional que procesa la señal en el dominio del tiempo es usar el método de filtración. Este método puede ser usado como una alternativa práctica para el análisis de la señal que contiene altas frecuencias y esto hace el análisis del proceso sencillo, Braun S., Lenz E. (1996). Cuando este método se aplica, el proceso de cálculo como primer paso involucra un filtro pasa-banda de la señal. El filtro pasa-baja, pasa-alta y pasa banda, pueden ser tratados como parámetros en el dominio del tiempo y a menudo se usan (como por ejemplo el filtro pasa-banda de la señal de vibración de 0.5 a 40 kHz en el caso de brocas delgadas), con el fin de concentrar el análisis en el intervalo de frecuencia donde la frecuencia natural rotacional del taladro se espera que caiga. La misma aproximación ha sido usada para el desgaste de la herramienta y la detección de fallas.

Debe resaltarse que el monitoreo del desgaste de la herramienta en el taladrado es un proceso periódico, por ejemplo barrenar un agujero, el cual normalmente no es de tiempo largo. Adicionalmente es posible reconocer ciertas etapas en el taladrado cuando el monitoreo es práctico, Quadro A.L., Branco J.R.T. (1997). Usualmente en el proceso primero la broca toca la pieza de trabajo y después progresivamente lo taladra a un cierto avance. Después de que la profundidad final es alcanzada, el mecanismo que hace que la herramienta baje se detiene y la broca se conserva girando pero sin

taladrar o avanzar. Un momento después la broca regresa desde el barrenado el cual es entonces terminado. Naturalmente, las señales medidas varían como una función de las etapas del taladrado.

3.1.2 - Promedio móvil autoregresivo.

Uno de los modelos matemáticos más utilizados en las aplicaciones consiste de una generalización del promedio clásico, este modelo se conoce por sus siglas en inglés como ARMA (Autoregressive-Moving Average), Radhakrishnan T., Wu S.M. (1991) y su forma genérica es:

$$Y_n + a_1 Y_{n-1} + \dots + a_{n_a} Y_{n-n_a} = b_0 X_n + \dots + b_{n_b} X_{n-n_b} \quad (2.1)$$

Con este sistema es posible realizar diagnóstico de fallas en línea, utilizando las señales de la fuerza de avance y del torque y su densidad espectral. Esta técnica ha sido llamada Sistema de Datos Dinámico (DDS), además permite determinar la influencia de variación de cada componente de frecuencia y su relación con la varianza global de los datos. En términos generales la técnica DDS muestra que los cambios en las componentes de frecuencia de las señales de avance y corte pueden ser usados para monitorear los cambios de la broca en línea.

3.1.3 - La Transformada de Fourier

Otra herramienta importante en la detección de fallas es la transformada de Fourier, ya que permite hacer una representación de una señal en términos de las señales armónicas, la relación fundamental para construir esta transformación es el producto interno.

$$\langle f, g \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t)^* dt \quad (2.2)$$

que permite definir la ortogonalidad de dos funciones f y g cuando se cumpla:

$$\langle f, g \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t)^* dt = 0 \quad (2.3)$$

De acuerdo a esta definición existen diferentes conjuntos que se pueden considerar como bases para el espacio vectorial de señales. Para señales definidas cero fuera de un intervalo $[0, T]$ (o periódicas) se selecciona :

$$\varphi_n(t) = e^{jnwot} \quad (2.4)$$

y en este caso se obtiene:

$$v(t) = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} C_n e^{jnwot} \quad (2.5)$$

Donde los “ C_n ” son los coeficientes de la expansión lineal. Los exponenciales de la expresión anterior, son conocidos como funciones de síntesis, Kailath T. (1980). Los coeficientes “ C_n ” representan el grado de similitud que el vector “ v ” tiene con el exponencial “ n ”.

$$C_n = \int_{-\infty}^{\infty} v(t)\varphi_n^*(t)dt = \int_{-\infty}^{\infty} v(t)e^{-jnwot} dt \quad (2.6)$$

En términos generales se define la transformada de Fourier directa e inversa como:

$$\begin{aligned} F(w) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{jw t} dt \\ f(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(w) e^{-jw t} dw \end{aligned} \quad (2.7)$$

3.1.4 - La Transformada de Fourier Discreta

La versión discreta de la transformada de Fourier, se representa como:

$$F(n\Omega) = \sum_{k=0}^{N-1} f(kT)e^{-j\Omega Tnk}, n = 0, 1 \dots N-1 \quad (2.8)$$

en esta expresión $\{f(kT)\}$ representa N muestras, de una señal en el tiempo, espaciadas igualmente en el intervalo $(0, NT)$, Los parámetros de frecuencia y T pueden normalizarse de manera que no aparezcan explícitamente en la expresión (2.9) dado que sólo entran como factor de escala para interpretar los resultados y no se necesitan en los cálculos.

3.1.5 - Transformada Rápida de Fourier (FFT)

La transformada rápida de Fourier (FFT), es un algoritmo eficiente de la transformada discreta de Fourier y sirve para encontrar el contenido de la señal original en cada una de las frecuencias.

Asumiendo que hay una influencia por desgaste de la herramienta en el contenido de frecuencia de la señal medida, la FFT sirve para como herramienta de calculo para determinar los cambios en el proceso. Aunque el cálculo del espectro de potencia es una herramienta muy poderosa para eliminar el ruido y las perturbaciones, Jantunen E., Jokinen H. (1996), sufre de algunas limitaciones :

- (a) Materiales como la fundición no son homogéneos y afectan la amplitud de la medición, esto causa falsas alarmas.
- (b) Un daño en la herramienta del taladrado produce una vibración transitoria de alto nivel armónico, que se atenúa por el procedimiento de promedios, típicamente usado en el cálculo del espectro. Esto hace difícil extraer una característica discriminatoria para distinguir los cambios en la condición de la herramienta.

(c) La dureza no uniforme de la pieza de trabajo produce desgaste prematuro en los filos de la herramienta y micro rompimientos que causan falsas alarmas, dado que incrementan la amplitud de la vibración.

Al hacer un análisis, algunas veces el número de puntos en el dominio del tiempo, se conserva muy pequeño comparado con los valores típicos, ejemplo 2048.

Si se usa una muestra de longitud pequeña, los cálculos son mas rápidos pero también la resolución de la frecuencia es baja, lo cual tiene la ventaja de que aunque la amplitud varíe un poco, la frecuencia permanece.

Otra ventaja es que de este modo, con la longitud de muestra pequeña, el número de características posibles que son usadas como entrada para un sistema de diagnóstico es bajo.

Para el caso de la FFT, se tiene:

$$F_D(n) = \sum_{k=0}^{N-1} f(k)W^{nk} \quad (2.9)$$

y el número complejo W satisface:

$$W^l = e^{\frac{-j2\pi l}{N}}, l = 0, 1, 2, \dots \quad (2.10)$$

$$W^N = W^0 = 1 \quad (2.11)$$

$$W^{\frac{N}{2}} = -1 = -W^0 \quad (2.12)$$

$$W^{N-l} = [W^l]^* \quad (2.13)$$

3.1.6 - La Transformada de Fourier con Ventana

Sea $g(u)$ una función que es cero fuera del intervalo $-T \leq u \leq 0$, esta función de peso o "ventana", será usada para localizar señales en el tiempo. La función g , puede ser compleja, aunque en la mayor parte se considera real. Si f es una función para cada t en los reales R , se define la transformada de Fourier con ventana de f como:

$$f(w, t) = \hat{f}_t(w) = \int_{-\infty}^{\infty} g(u-t) f(u) e^{-2\pi j w u} du \quad (2.14)$$

Si se considera:

$$g_{w,t}(u) = e^{2\pi j w u} g(u-t) \quad (2.15)$$

$$\|g_{w,t}\| = \|g\|$$

Entonces

$$f(w, t) = \langle g_{w,t}, f \rangle \quad (2.16)$$

En este caso la reconstrucción de la señal original a partir de la señal $f(w, t)$, a es:

$$f = C^{-1} \iint g_{w,t} f(w, t) dw dt \quad (2.17)$$

$$C = \|g\|^2$$

esta relación permite recuperar de manera local la señal original.

Como conclusión podemos decir que existen un gran número de técnicas basadas en FFT, tales como la autocorrelación, espectro de potencia, correlación-cruzada, espectro-cruzado etc. que han sido probadas a nivel laboratorio para monitorear el desgaste de la herramienta en el corte de material incluyendo el taladrado. Sin embargo a nivel industrial no han demostrado ser tan funcionales por su dependencia de las múltiples condiciones en el proceso.

3.1.7 - La Transformada de Ondoletas

La transformada de Ondoletas es una representación en el dominio tiempo-frecuencia de la señal original que permite extraer mas información en el dominio del tiempo a diferentes bandas de frecuencia. Ambas, la Transformada Continua y Discreta de Ondoletas se usan para la detección de daños en herramienta, usando las señales de corriente del husillo y avance de la broca.

Para comparar las variaciones de las señales después de la Transformación de Ondoleta es necesario usar algún método de análisis, como por ej. Lógica Difusa, Redes Neuronales. En esta tesis aplicaremos el algoritmo de Simetría desarrollado por Romero T. Rene y Herrera R. Gilberto (2004).

El uso de Ondoletas se justifica debido a las debilidades que tiene la FFT, la primera es su resolución fija, que depende de la frecuencia de muestreo y del número de puntos de datos.

La segunda debilidad es la representación del espectro completo, que supone una ventana de datos repetida indefinidamente.

Esta suposición causa problemas de pérdida de información y las transiciones no pueden ser identificados en la ventana de datos. Una tercera debilidad es el nivel de ruido debido al gran número de grados de libertad del sistema. Lo que implica que el análisis con FFT debe ser repetido varias veces y los resultados deben ser promediados para obtener una salida suave. Para este trabajo, usamos un sistema de Ondoleta del tipo Daubechies que usa una base ortonormal.

Una opción para evitar lo anterior es la transformada de Fourier con Ventana. Sin embargo el ancho T de la ventana se vuelve un factor crítico dado que cualquier característica de la señal original que involucre intervalos de tiempo más cortos que el ancho T de la ventana, no quedan bien localizados, y deben obtenerse a través del resultado constructivo o destructivo de interferencia entre

“notas”, lo cual significa que muchas “notas” son necesarias y $f(\omega, t)$ debe de ser esparcido en un amplio rango. De forma análoga cualquier característica de la señal que involucre intervalos de tiempo mucho mayores que el ancho T de la ventana, tampoco son bien localizados por esta construcción. Lo anterior hace a la transformada de Fourier una herramienta no muy útil, cuando se desea analizar características de la señal, ya sea rápidas o lentas respecto al ancho T .

Por lo anterior la transformada de Fourier con Ventana (WFT) sólo resuelve el problema de manera parcial.

Para evitar esto se introduce, una función ventana de valor complejo, conocida como Ondoleta madre o Ondoleta básica, la cual se simboliza como $\varphi(u)$. Para evitar cualquier compromiso con los factores de escala, se usan todas las escalas posibles, es decir se considera :

$$\varphi_s(u) = |s|^{-p} \varphi\left(\frac{u}{s}\right) \quad (2-18)$$

$$\forall p \geq 0 \text{ y } s \neq 0$$

El parámetros “s”, es conocido como el factor de escala en el eje horizontal, y sus efectos son los siguientes:

- i) $s > 1$ la gráfica se alargará por un factor de s .
- ii) $0 < s < 1$ la gráfica será comprimida.
- iii) $s = 1$ la gráfica será la misma sin ninguna modificación.
- iv) $s = -1$ la gráfica será de las mismas dimensiones pero reflejada.
- v) $s < -1$ será alargada y reflejada.
- vi) $-1 < s < 0$ la gráfica será comprimida y reflejada.

Esta Ondoleta tiene como soporte un intervalo T cerca de $u=0$, y la función:

$$\varphi_{s,t} = \varphi_s(u-t) = |s|^{-p} \varphi\left(\frac{u-t}{s}\right) \quad (2-19)$$

tiene soporte de longitud $|S|T$ cerca de $u=t$.

Además la Ondoleta madre satisface:

$$\|\varphi_{s,t}\|^2 = |s|^{-2p} \int_{-\infty}^{\infty} \left|\varphi\left(\frac{u-t}{s}\right)\right|^2 du \quad (2-20)$$

Las transformaciones de la expresión anterior son las Ondoletas generadas por la Ondoleta madre, y juegan un papel similar al realizado por las funciones “g(u)” de la transformada de Fourier de Ventana (WFT). La Transformada de Ondoletas Continua de una señal f(t) está dada por, Xiaoli Li, Dong S., Yuan Z. (1999):

$$f(s,t) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_{s,t}(u) f(u) du = \langle \varphi_{s,t}, f \rangle \quad (2-21)$$

La reconstrucción de la señal se obtiene a partir de la expresión:

$$f(u) = \int_0^{\infty} w(s) s^{p-1} ds \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_{s,t}(u) f(s,t) dt \quad (2-22)$$

La deducción de la expresión anterior, requiere de algunos cálculos complicados que se salen del objetivo de la presente tesis, por lo que se recomienda al lector interesado consultar, Xiaoli Li, Dong S., Yuan Z. (1999). Algunas de las Ondoletas madre más usadas, son las siguientes:

$$\begin{aligned} \varphi(u) &= ue^{-uu} \\ \varphi(u) &= \frac{e^{-uu/2}}{\sqrt{2\pi}} \end{aligned} \quad (2-23)$$

Las cuales se muestran en las graficas siguientes.

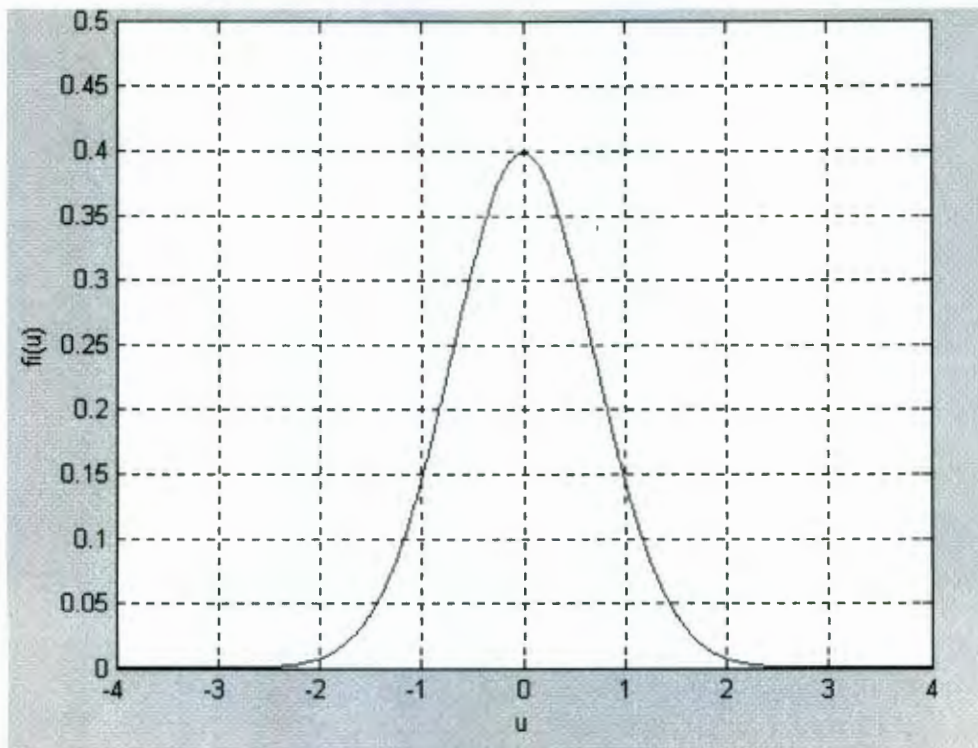


Fig. 3.1 Ondoleta Madre Gaussiana

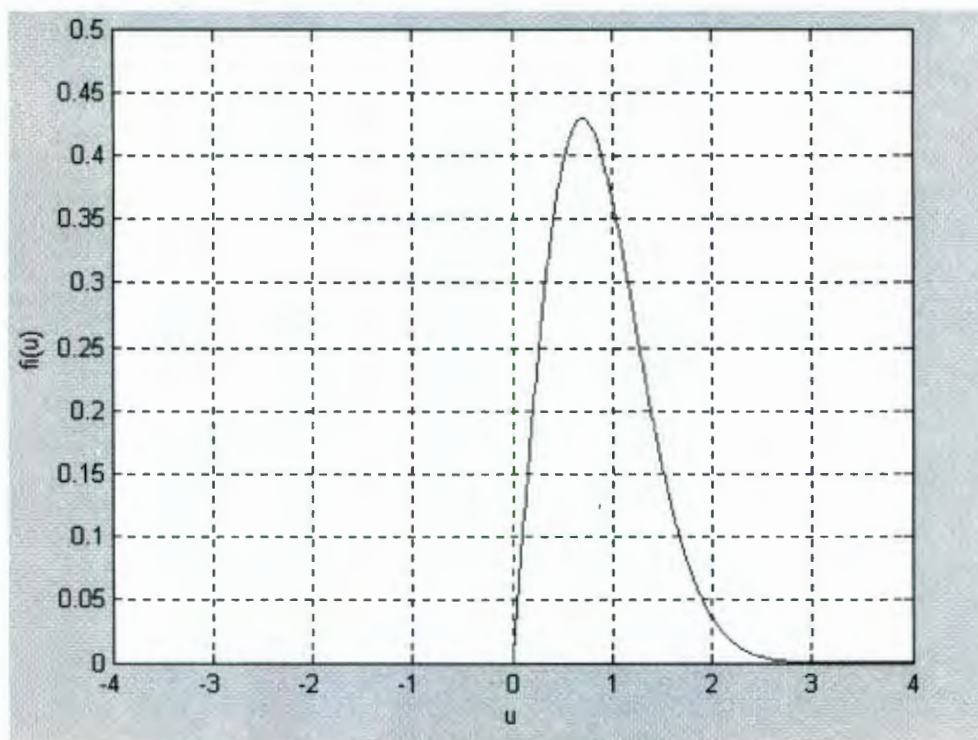


Fig. 3.2 Ejemplo de Ondoleta Madre

3.1.8 - La Transformada Ondoleta Discreta

La Transformada Continua de Ondoletas definida anteriormente como $f(s,t)$, también se usa en la literatura, Xiaoli Li, Dong S., Yuan Z. (1999). como:

$$f(s,t) = CWT\{x(t); a, b, \} = \int x(t)\bar{\varphi}_{a,b}(t)dt \quad (2-24)$$

Los parámetros a , b , corresponden a los parámetros de escala s , y desplazamiento en el tiempo “ t ” respectivamente usados en la definición de $f(s,t)$, las variable de integración que se uso fue “ u ”, que viene a ser “ t ” en esta nueva nomenclatura.

Los coeficientes de una serie de Ondoletas son los coeficientes de la CWT muestreados; el tiempo permanece continuo, pero los parámetros escala “ a ” y de desplazamiento en tiempo “ b ” son discretizados sobre un plano tiempo-escala, Xiaoli Li, Dong S., Yuan Z. (1999).

Una notación común es:

$$C_{j,k} = CWT\{x(t); a = 2^j, b = k2^j\}_{-j,k \in Z} \quad (2-25)$$

con la Ondoleta:

$$\varphi_{j,k}(t) = 2^{-j/2}\varphi(2^{-j}t - k) \quad (2-26)$$

La serie de los coeficientes de Ondoletas, ha sido populariza bajo la forma de una descomposición de señal dentro de “Ondoletas ortogonales” por Meyer y Daubechies.

La Transformada de Ondoleta Discreta (DWT) ha sido reconocida por una transformada de Ondoletas naturales para señales en el tiempo discretas, y en esta transformación, tanto el tiempo como los parámetros desplazamiento-tiempo y escala son discretos.

Una serie de Ondoletas, descompone la señal original en el tiempo $x(t)$, dentro de una expansión o síntesis de funciones bases continuas en el tiempo, Xiaoli Li, Dong S., Yuan Z. (1999), es decir:

$$x(t) = \sum_{j \in Z} \sum_{k \in Z} C_{j,k} \varphi_{j,k}(t) \quad (2-27)$$

Esta es una expresión de “síntesis de Ondoletas”, que corresponde a los parámetros a y b (j es llamada la octava). Los coeficientes de la serie de Ondoletas, se definen como:

$$C_{j,k} = \int x(t) \bar{\varphi}_{j,k}(t) dt \quad (2-28)$$

Nótese que el esquema de la serie de Waveletes, puede ser llamado como la “transformación de series de Ondoletas” (WST). La DWT, es de hecho muy cercana a las series de Ondoletas, pero en contraste, esta se aplica a señales discretas en el tiempo. Esto logra una descomposición de multiresolución sobre J octavas, enumeradas por $j = 1, 2, \dots, J$ dada por:

$$x[n] = \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k \in Z} C_{j,k} h_j[n - 2^j k] + \sum_{k \in Z} m_{J,k} g_J[n - 2^J k] \quad (2-29)$$

Esta ecuación, es la expresión síntesis de la DWT, donde la sucesión $h[n]$ es la versión discreta de la Ondoleta usada, adicionalmente, se ha agregado un término paso-bajo, para asegurar la reconstrucción, la secuencia $g[n]$ es llamada “secuencia de escalado”.

La DWT calcula los “coeficientes de Ondoletas” C_{jk} para $j=1, 2, \dots, J$ y los coeficientes de escalado “ m ” dados por:

$$DWT\{x[n]; 2^j, k2^j\} = C_{j,k} = \sum_n x[n] \bar{h}_j[n - 2^j k]$$

$$m_{j,k} = \sum_n x[n] \bar{g}_j[n - 2^j k]$$
(2-30)

Donde $h[n]$ representa las Ondoletas discretas de análisis. Otra consideración importante, es que la secuencia de escalado y Ondoletas, deberán ser calculados de forma recursiva.

$$g_{j+1}[n] = \sum_k g_j[k] g[n - 2k]$$
(2-31)

análogamente para la Ondoleta $h[n]$.

3.1.9 – Ejemplos de la Transformada de Fourier y la Transformada de Ondoletas

A continuación se muestran dos ejemplos de estas transformaciones:

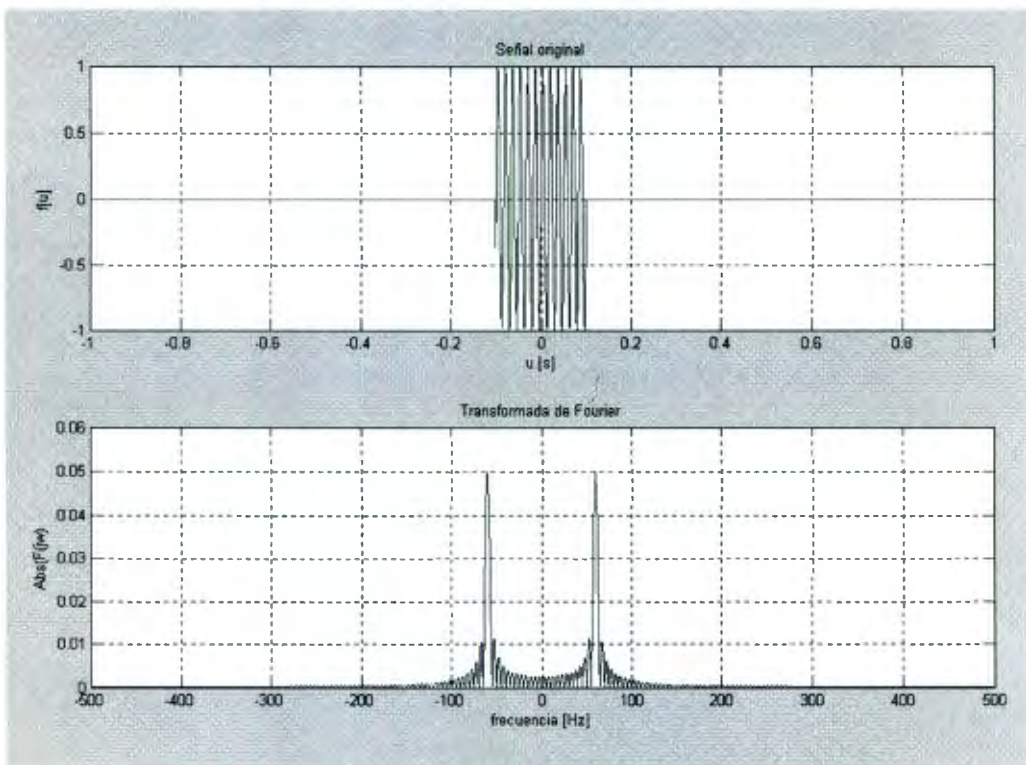


Fig. 3.3 Transformada de Fourier de la señal en el tiempo $f(u)$

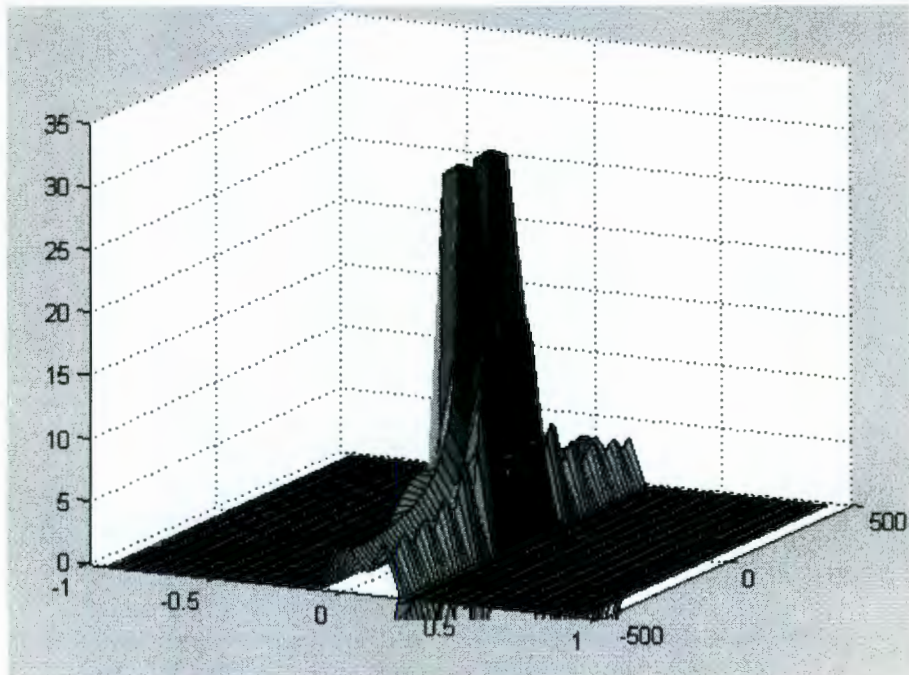


Fig 3.4 Transformada de Fourier con ventana de $f(u)$

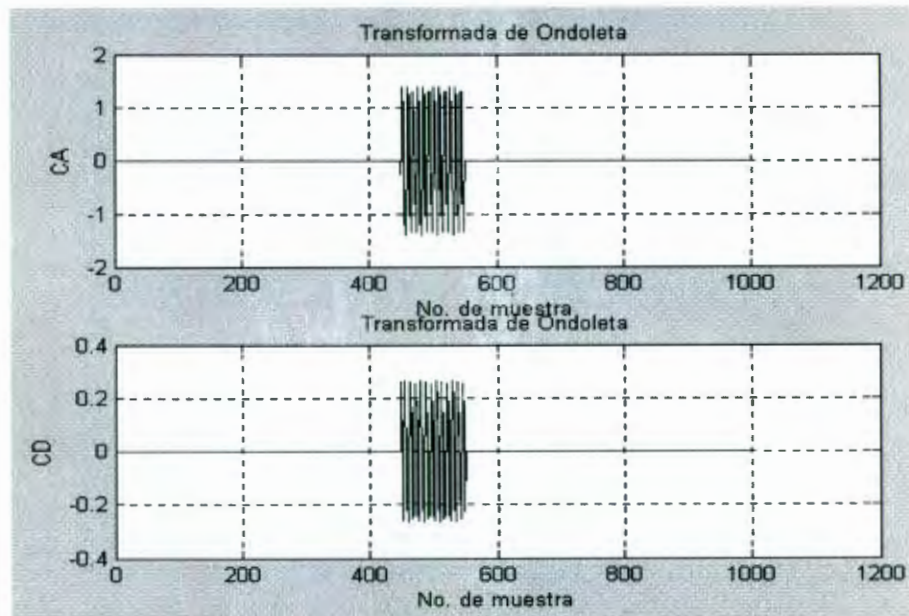


Fig 3.5 Coeficientes de Aproximación y Detalle de la Transformada de Ondoletas de $f(u)$

En la figura 3.7 se aprecia poca diferencia entre los coeficientes CA (aproximación) y los CD (coeficientes de detalle), pero veamos que sucede cuando tenemos una señal en el tiempo ruidosa:

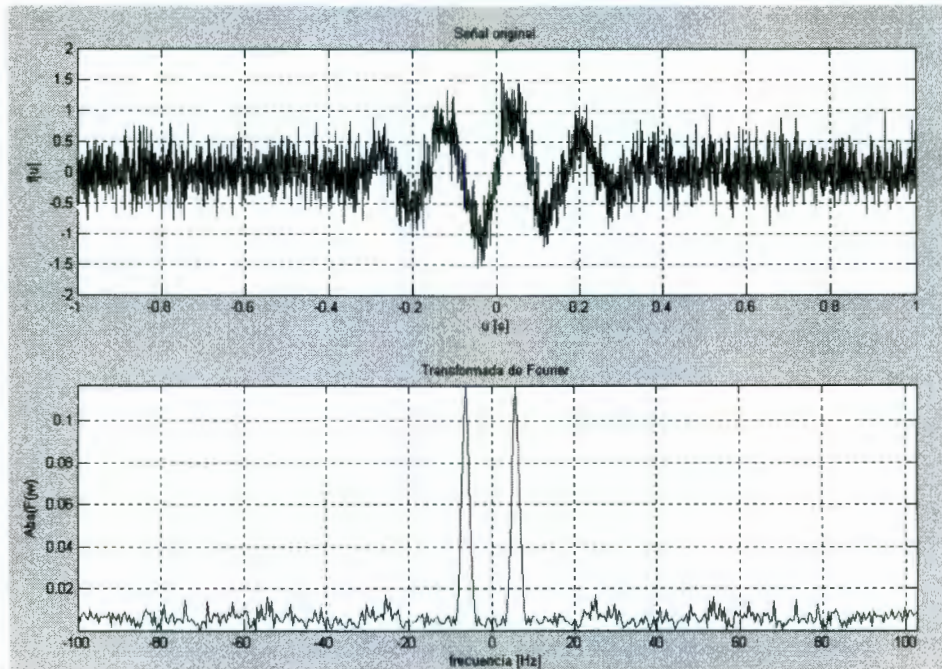


Fig. 3.6 Transformada de Fourier de la señal ruidosa en el tiempo $f(u)$

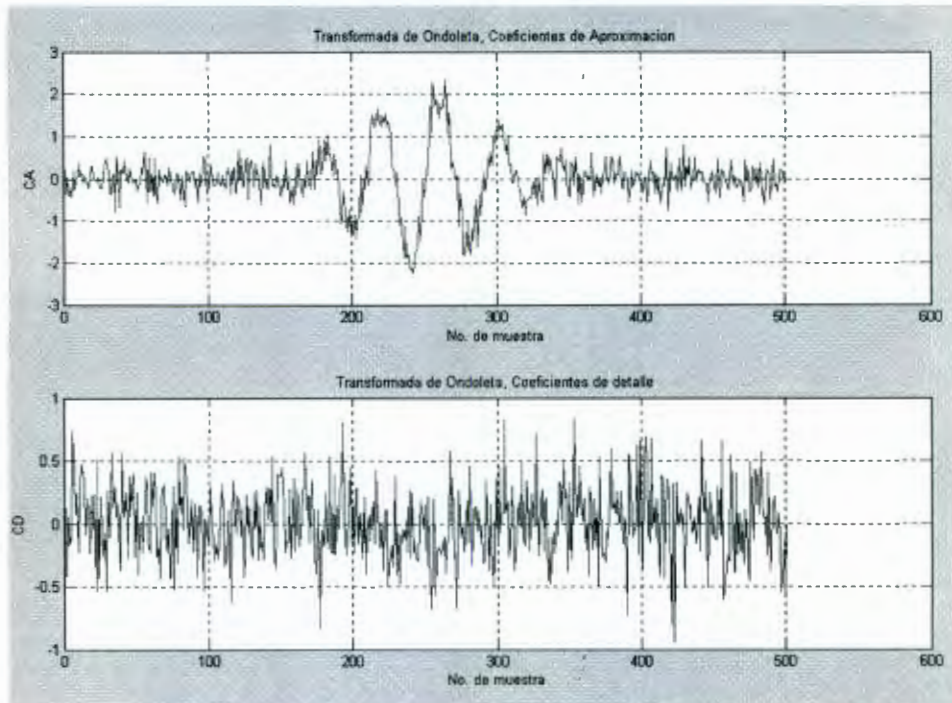


Fig. 3.7 Coeficientes de Aproximación y Detalle de la Transformada de Ondoleta de $f(u)$ ruidosa

Aquí se aprecia la ventaja de la Transformación de Ondoleta ya que si consideramos los coeficientes de aproximación CA y descartamos los coeficientes de detalle CD, estamos filtrando nuestra señal ya que los coeficientes CA nos dan la forma

de onda de la señal original pero menos ruidosa y con menos puntos, lo que simplifica el análisis de señales.

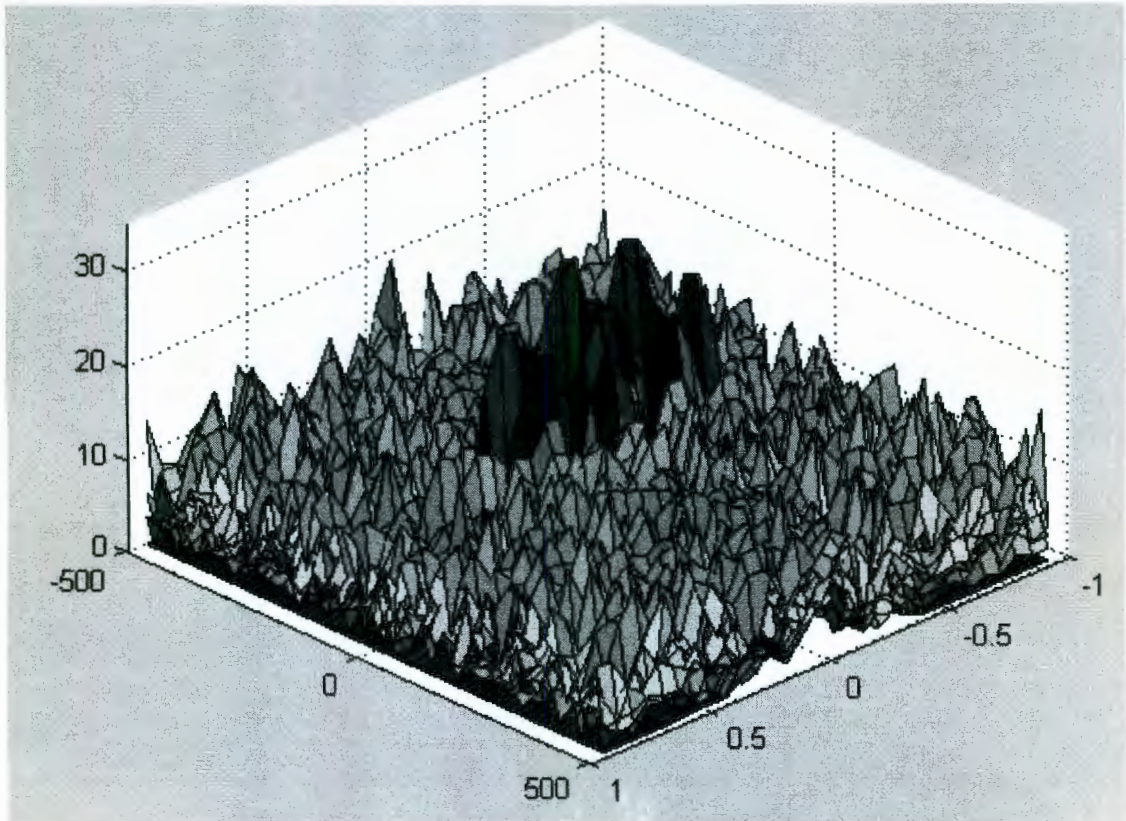


Fig 3.8 Transformada de Fourier con ventana de la señal en el tiempo ruidosa $f(u)$

Estos ejemplos confirman que la transformada de Fourier es una herramienta excelente para el estudio de señales periódicas, sin embargo, no es eficiente en el caso de señales en el tiempo que no son periódicas. El uso de la Transformada de Fourier con ventana no nos permite analizar la señal pura en cuestión, con esto se comprueba que el uso de la transformada de Ondoletas resulta excelente para nuestro análisis de la señal de corriente del controlador en el proceso de taladrado.

3.2 INSTRUMENTACIÓN

3.2.1 Esquema del modelo físico del taladrado

Una broca, como la que se muestra en la figura 3.9, tiene un filo en la parte inferior y dos labios de corte helicoidales con un ángulo cónico (k_t) que se une con el lado longitudinal (flute) y con el ángulo de hélice β_0 . El lado longitudinal no corta; éste es usado para extraer la rebaba del barreno perforado. El filo inferior (chisel) tiene un ancho $2W$ y un ángulo de ψ_c . Los labios expanden el barreno removiendo el material con un ancho de rebaba constante (h) dependiendo de la penetración de la broca en el material para un rango de avance c [mm/rev]. La fuerza de avance que es usada para empujar la broca en la pieza de trabajo y el torque aplicado a la herramienta y al husillo, se requieren para evaluar la mecánica de la operación de taladrado.

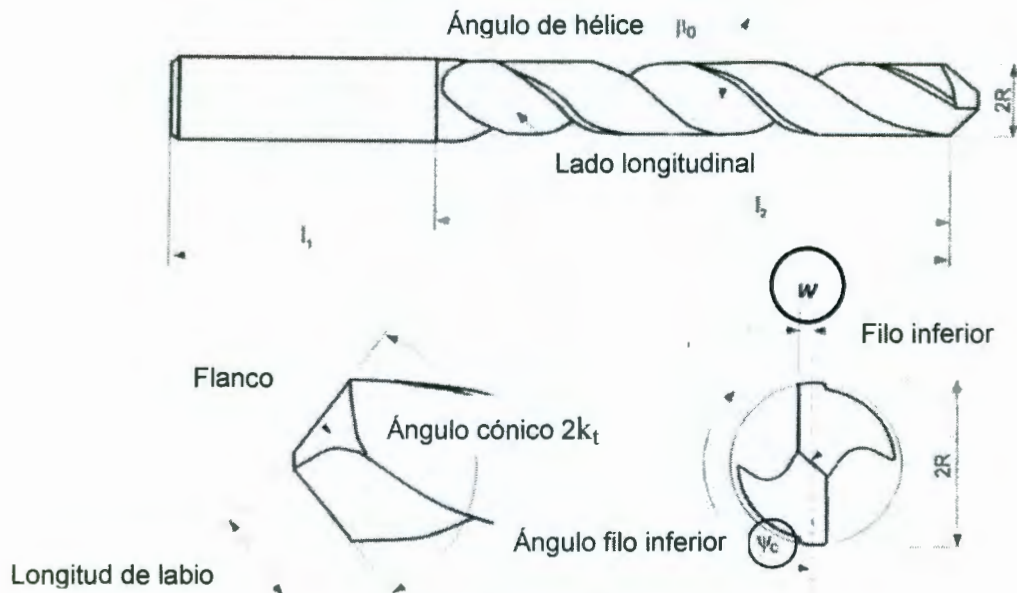


Fig. 3.9 Geometría de la broca

El filo inferior no corta, solamente separa el material a maquinarse hacia los lados como un mecanismo dentado. Si el proceso se simplifica para una sola dureza,

entonces la fuerza de avance que actúa sobre el filo inferior puede ser simplificado, Altintas (2000), como:

$$THRUST_i = F_{z,i} = A_{ch} H_B \quad (3.1)$$

Donde: $F_{z,i}$ es la fuerza de avance
 H_B es la dureza Brinell de la pieza de trabajo
 A_{ch} es el área instantánea que cubre el filo inferior

La geometría del filo inferior y la forma en que trabaja es compleja y requiere detallar el modelado geométrico y de una calibración experimental de varios factores empíricos. Recientemente, la geometría del filo inferior ha sido mejorada significativamente por los fabricantes de herramienta, para evitar que se resbale la broca en la pieza de trabajo durante la penetración. Para consideraciones prácticas, la fuerza del filo inferior puede asumirse de entre 10-15 % de la fuerza de corte del labio y su torque puede no ser considerado ya que el ancho del filo (2ω) es mucho mas pequeño.

La geometría del labio de corte en una broca es muy compleja. Se usan transformaciones de corte ortogonales a oblicuas siendo necesario identificar la hélice, la inclinación normal y ángulos oblicuos en los puntos de corte a lo largo del labio. Si el labio de la broca lo partimos en pequeños elementos diferenciales con una altura dz y un ancho Δb , cada labio diferencial remueve una rebaba con un área de:

$$DA(z) = \Delta b \cdot h \quad (3.2)$$

Donde el ancho de rebaba (h) removido por uno de los dos lados longitudinales y el ancho de viruta (Δb) son:

$$h = (c/2) \cdot \sin k_t \quad (3.3)$$

$$\Delta b = dz / \cos k_t \quad (3.4)$$

Las fuerzas de corte en el sentido tangencial (paralelo a la velocidad de corte) y radial se expresan como:

$$\begin{aligned}
 dF_t(z) &= K_{tc}(z)dA + K_{te} \Delta b \\
 dF_f(z) &= K_{fc}(z)dA + K_{fe} \Delta b \\
 dF_r(z) &= K_{rc}(z)dA + K_{re} \Delta b
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

Donde los coeficientes de corte para cada elemento a la altura z son diferentes debido a la variación de la hélice, a la inclinación normal y los ángulos oblicuos. Las constantes de filo o borde K_{te} , K_{fe} , y K_{re} son evaluadas experimentalmente, y las constantes K_{tc} , K_{fc} , y K_{rc} son evaluadas de una base de datos de corte ortonormal usando transformaciones oblicuas.

Las componentes elementales de la fuerza de corte (dF_t , dF_f , dF_r) pueden ser evaluados en las direcciones x, y, z como se muestra en la fig. 3.10:

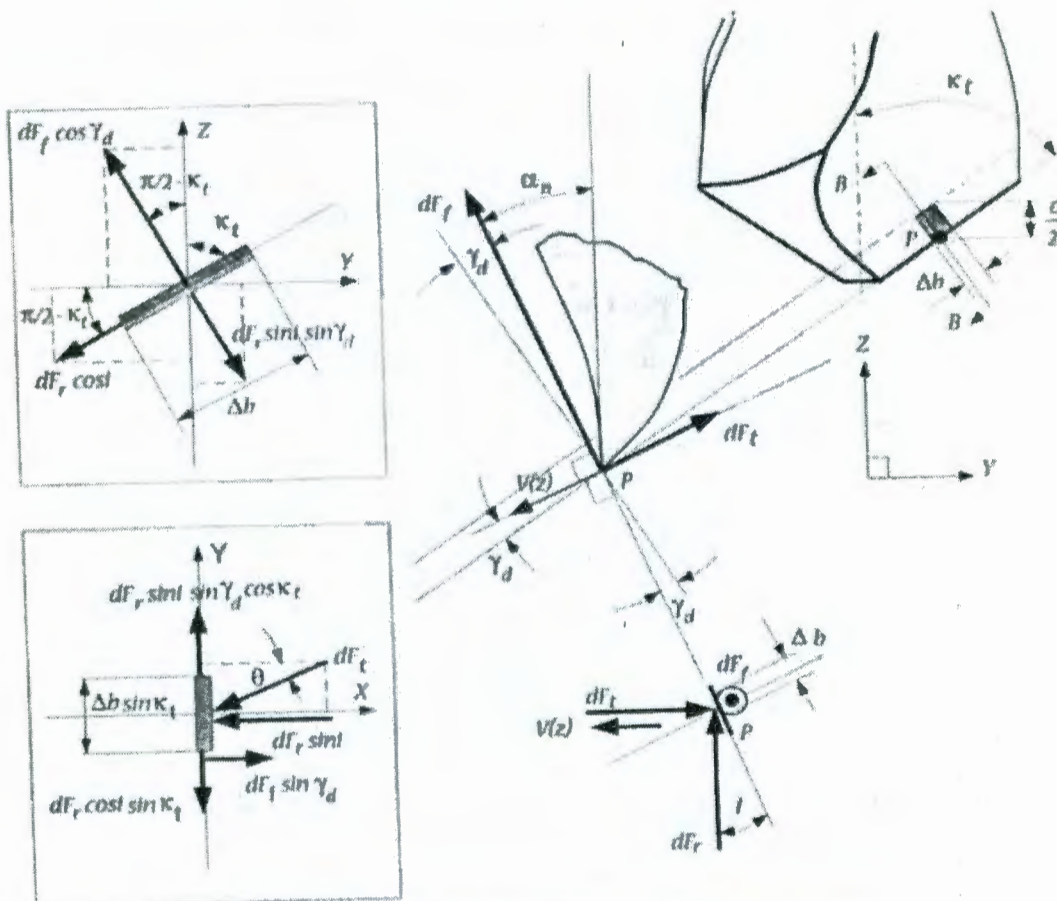


Fig. 3.10 Dirección de las fuerzas en el proceso de taladrado

Donde:

$$\begin{aligned}
 dF_x(z) &= [dF_f \sin \gamma_d - dF_t \cos \theta - dF_r \sin i] \\
 dF_y(z) &= [dF_r (\sin i \cdot \sin \gamma_d \cdot \cos k_t) - dF_f \cos \gamma_d \cdot \cos k_t - dF_t \sin \theta] \\
 dF_z(z) &= [dF_f \cos \gamma_d \cdot \sin k_t - dF_r (\cos i \cdot \cos k_t + \sin i \cdot \sin \gamma_d \cdot \sin k_t)]
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

El total de la fuerza de avance y torque ejercido sobre la broca por dos labios de corte puede ser evaluado como:

$$\begin{aligned}
 \text{FUERZA } ii &= 2 \sum_{m=1}^M dF_z(z) \\
 \text{TORQUE } ii &= 2 \sum_{m=1}^M dF_t(z) \cdot r(z)
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

La fuerza de avance total ejercida sobre la broca se encuentra si sumamos la contribución de la fuerza del filo inferior (i) y de los labios de corte (ii):

$$\text{FUERZA} = F_{z,i} + \text{FUERZA } ii \tag{3.5}$$

Con el incremento del uso de máquinas controladas por computadora, herramientas e implementos usados para automatizar en la industria, el desarrollo confiable de las herramientas de corte ha tomado una gran importancia. Una vez programado el taladro, las herramientas operan con una supervisión directa mínima del operador. Consecuentemente, las fallas en las herramientas de corte pueden tener serios efectos en la calidad de las partes maquinadas así como en la eficiencia y economía de las operaciones de taladrado.

3.2.2 Adquisición de datos

Para obtener las señales generadas en el proceso de corte, se emplea una Tarjeta de Adquisición de datos de National Instruments la cual usa la interfaz periférica programable (PPI) MSM82C55. Este chip provee 24 líneas digitales en forma de 3 puertos, A, B y C.

La tarjeta de adquisición cuenta con las siguientes características:

- Modelo: DAQCard-1200.
- Conectores: Un conector PCMCIA de 68 pines para el puerto de la computadora
Un conector para las señales de entrada/salida de 50 pines
- Dos convertidores analógico-digitales de 12 bits
- Número de canales: 8 entradas analógicas en operación "modo simple" ó 4 en modo diferencial
- 2 salidas analógicas con salida configurable $\pm 5V$ bipolar ó 0-10 V unipolar
- Líneas de TTL: 24 entradas/salidas digitales.
- Canales de sincronización: 3 contadores/temporizadores de 16 bits para las entradas/salidas
- Razón de Muestreo: 120 ks/s
- Voltaje de entrada: $\pm 5V$ bipolar ó 0-10 V unipolar



Fig. 3.11 Adquisición de las señales del taladro

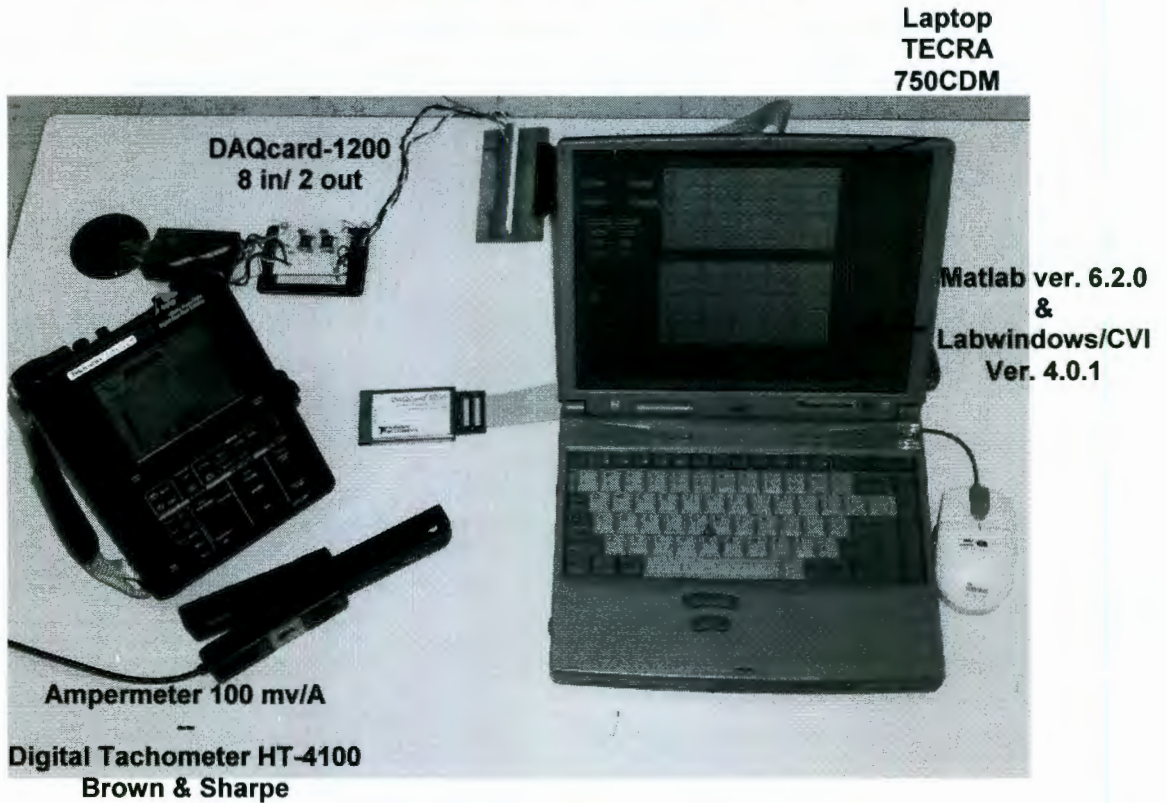


Fig. 3.12 Equipo usado para la adquisición de las señales

3.2.3 AMPLIFICADOR DEL HUSILLO



Fig. 3.13 Controlador Safronics VG10

Cabe mencionar, que no se usaron sensores adicionales en este experimento, sino que se están utilizando directamente las señales que proporciona el controlador. Lo cual permite que el proyecto sea más económico. El diagrama de conexión entre la PC y el amplificador se muestra en la figura 3.14. Del modo de operación del amplificador, se usa el modo torque, ya que el husillo trabaja a torque constante. En esta figura se muestran las conexiones del amplificador:

1. El voltaje de alimentación usado es de 440 Vca entre las terminales 4, 5 y 6 del conector J1.
2. El servomotor se conecta en las terminales 0, 1 y 2 del conector J3.
3. El CNC controlador de movimiento al recibir el comando por el operador, habilita a el amplificador, entre las terminales 13 y 14, para que conserve el servomotor con torque a velocidad cero y esté listo para el movimiento.

5. Entre las terminales 7 y 8 la computadora manda un voltaje llamado de referencia de 0 a 10 Vcd para incrementar o disminuir la velocidad de giro del husillo según lo requiera el proceso de taladrado.

6. En las terminales 12 y 13 conectamos el equipo de monitoreo de la señal de corriente del husillo para su análisis.

7. Entre las terminales 11 y 13 se tiene una señal normalmente en "1" que caerá a "0" cuando exista una condición anormal en el controlador, tales como sobrecarga, sobre temperatura, alto o bajo voltaje, etc., con lo cual el CNC deshabilita el avance de la herramienta de corte.

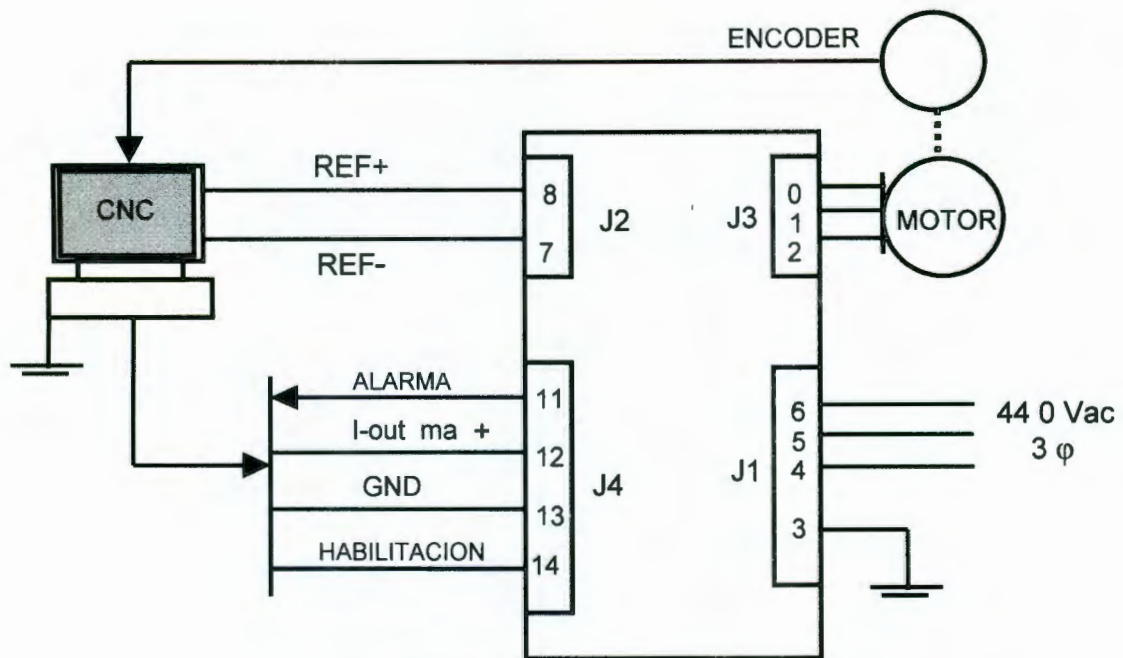


Figura 3.14 Conexiones del Controlador del Husillo en Modo Torque

3.2.4 Medición de señales reales

Para las señales que se muestran a continuación se consideran los siguientes parámetros:

- Velocidad del Husillo: 100 rpm.
- Velocidad de alimentación de material: 80mm/min.
- Broca: Kennametal No. Parte 4440301059
- Material maquinado: Pearlitic nodular as-cast Ductile Iron (SAE J434C grado D 7003).
- Profundidad de barreno: 10 in
- Refrigerante: Hocut 931
- Lugar de medición de señales: Puntos de prueba en el amplificadores del servomotor del husillo

La pieza usada para la toma de señales es el yugo pesado No. Parte Cardanes 6-3-3441, esta pieza es de una fundición “as-cast ductile iron” de 8.8 Kgs. La cual se aplica en el sector automotriz pesado para unir la transmisión con la flecha Cardan de los trailers DINA, International y Mercedes Benz.



Fig. 3.15 Yugo deslizante usado para las pruebas

Se usaron brocas con diferente nivel de desgaste del modelo que se ilustra, de longitud total de 25 plg, 2.1 plg de diámetro, hélice derecha de 24 grados, corte derecho.



Fig. 3.16 Broca Kennametal 4440301059 usada para las pruebas

Enseguida se muestran las condiciones usadas para las pruebas. La longitud del daño en la herramienta fue checado en un equipo "MetroTec Programmable Geometric Readout" modelo Projectron III.

Daño de la herramienta de corte	0.0"	0.42"	1.76"
Velocidad de la herramienta (husillo)	100 RPM		
Avance de corte de la broca	80.0 mm/min		
Profundidad de corte (barreno)	254.0 mm		

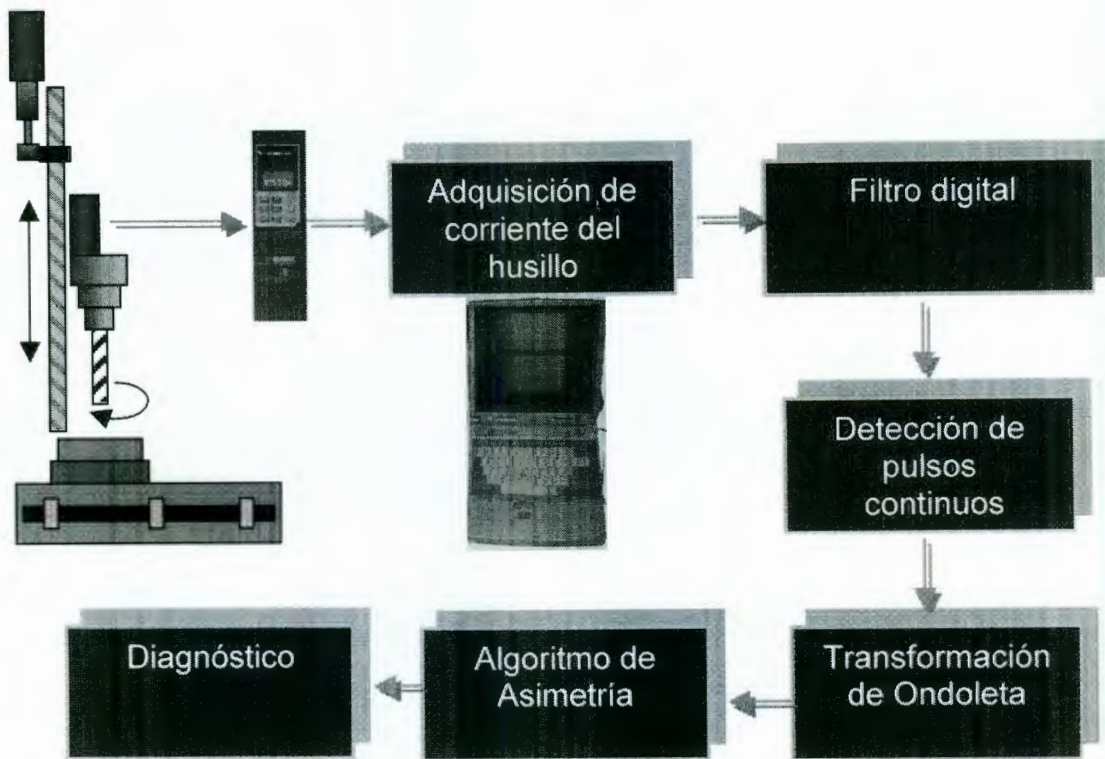


Fig. 3.17 Flujo de etapas para el desarrollo de los experimentos en el Taladro

El sistema de adquisición de la corriente del husillo a través de su controlador (Fig. 3.13), se muestra en la figura 3.17.

En la etapa del filtro digital, se eliminan las señales no deseadas, por lo que provee de información confiable y se simplifica el procesamiento de las señales en las subsecuentes etapas.

Gracias a que la señal del husillo se presenta como una señal senoidal de amplitudes variables, podemos aplicar el algoritmo de Asimetría. Antes de ello, se seleccionaron muestras partiendo de la detección de la primera cresta o valle de la señal muestreada, ya que con ello se podrán analizar dos pulsos consecutivos.

Con el fin de reducir los puntos al calcular la Asimetría y reducir su complejidad, aplicamos previamente la Transformación de Ondoletas a las muestras. Después de

ello, tendremos señales con pocos puntos lo cual simplifica considerablemente los cálculos de asimetría y con ello el tiempo de análisis.

Con esta información podemos dar un diagnóstico para la toma de decisiones dependiendo del daño en la broca y determinar si la máquina puede continuar en operación o debe ser detenida para realizar la acción correctiva correspondiente.

Una vez desarrollado el experimento, con las especificaciones técnicas anteriores, las señales obtenidas a través de la tarjeta de adquisición de datos durante el proceso de taladrado, se muestran a continuación:

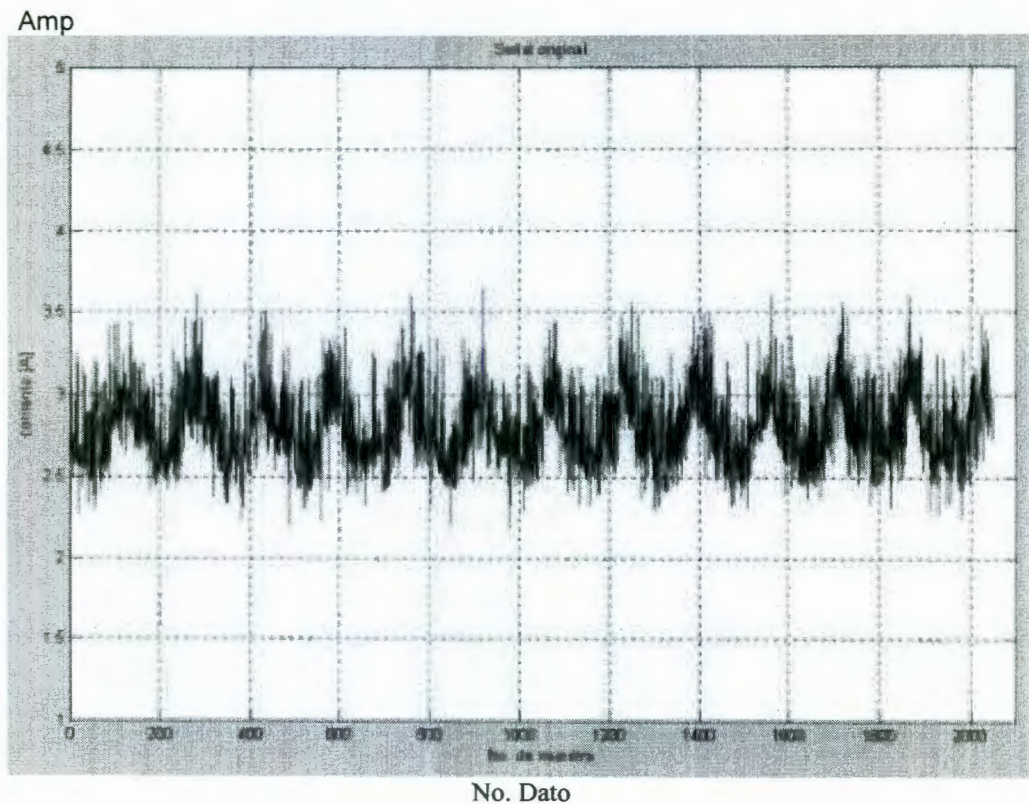


Fig. 3.18 Señal de una broca nueva

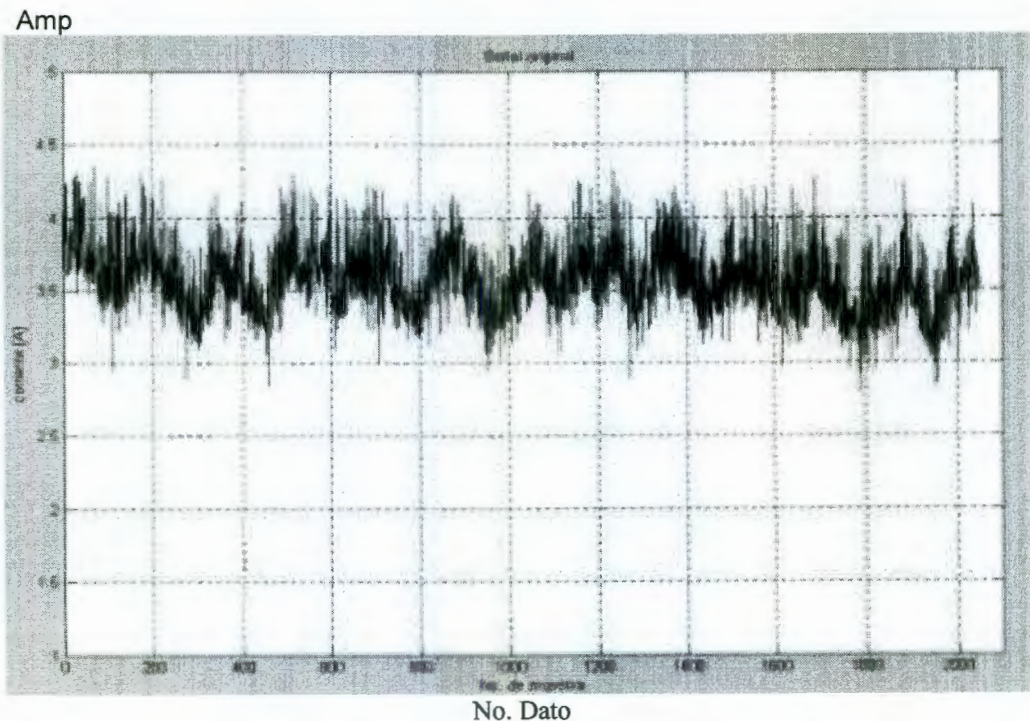


Fig. 3.19 Señal de una broca desgastada en 0.42 plg.

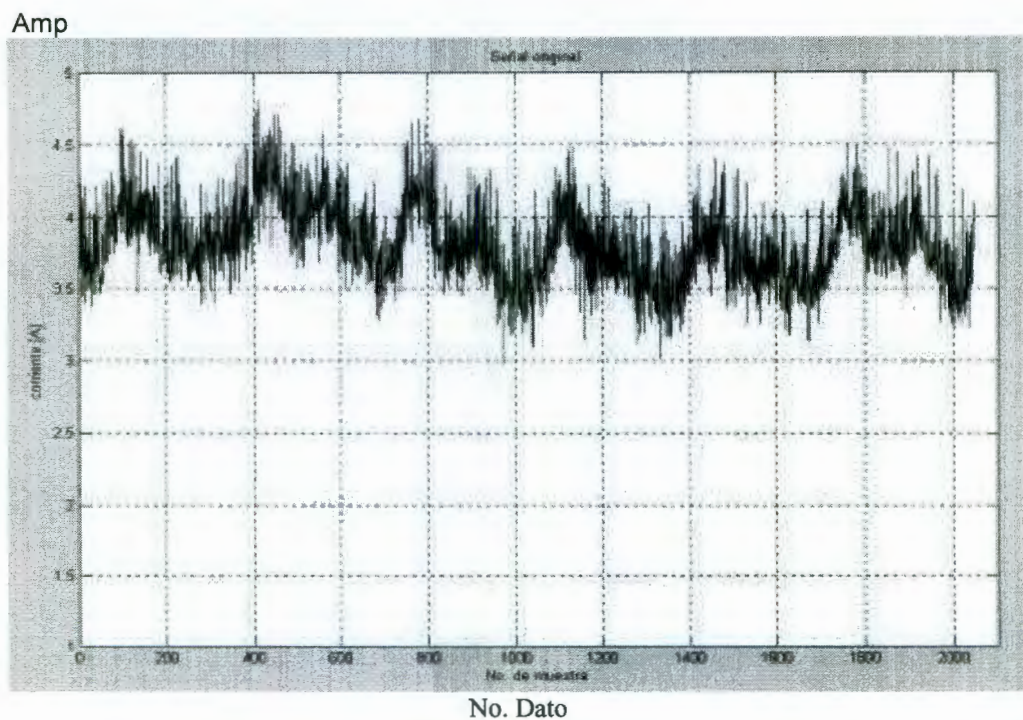


Fig. 3.20 Señal de una broca desgastada en 1.76 plg.

Para las condiciones mencionadas, velocidad de giro de la broca y avance constantes, de las figuras anteriores se puede resaltar lo siguiente:

- En brocas nuevas la señal en el tiempo se aprecia más periódica.
- En la broca con más daño (Fig. 3.20) ya no se aprecia la periodicidad de la señal dado el nivel alto de ruido.
- En la señal muestreada, para una broca nueva se tiene un valor de DC menor y se va incrementando conforme se agranda el daño en la misma.
- Realizar el análisis directamente de la señal en el tiempo, sería muy complicado y con resultados dudosos ya que la señal de interés se ve modificada por un alto nivel de ruido generado por el propio drive y señales eléctricas del control del torno.
- Se requiere filtrar la señal para eliminar la información no relevante y así considerar para nuestro análisis la forma de onda de la corriente del husillo.

3.3 PROCESAMIENTO DE SEÑALES

3.3.1 Señales

En esta sección se presenta el procesamiento que se realizó a las señales considerando la teoría del proceso de taladrado.

El estudio del proceso mencionado se hará a través de la corriente desarrollada por el servo-motor del husillo, dado que este parámetro está íntimamente ligado con las señales de corriente eléctrica en el controlador del husillo y las fuerzas en la broca presentes en el proceso de taladrado.

Amp

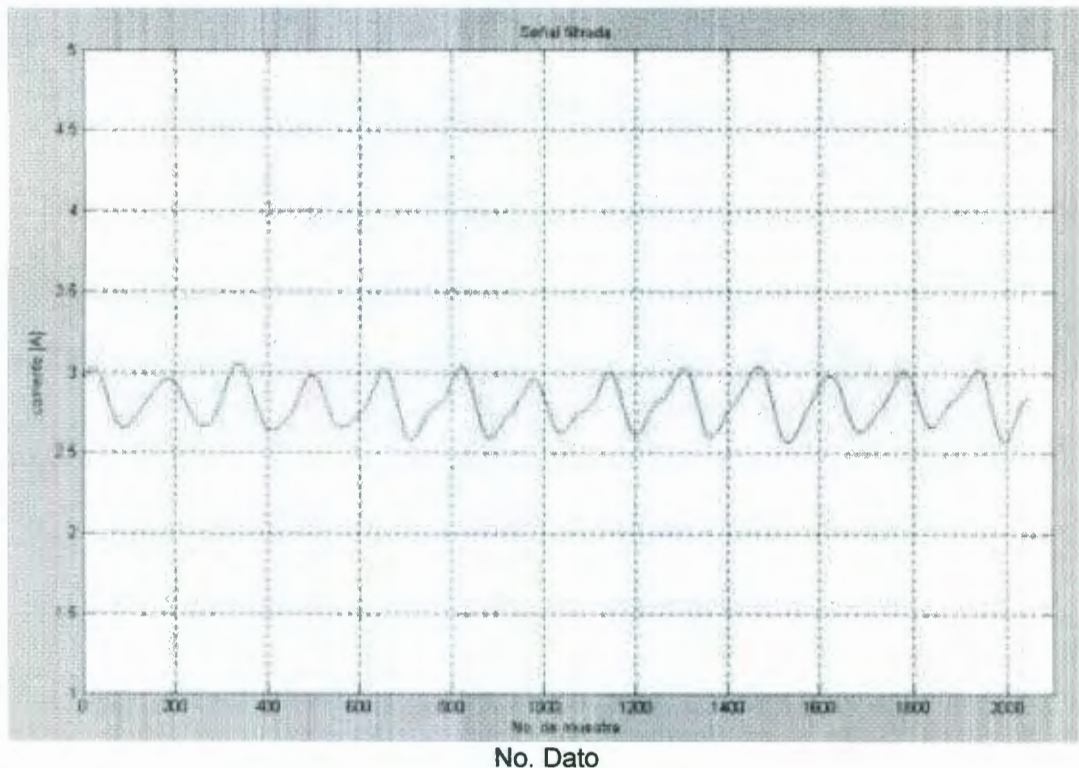


Fig. 3.21 Señal de una broca nueva ya filtrada

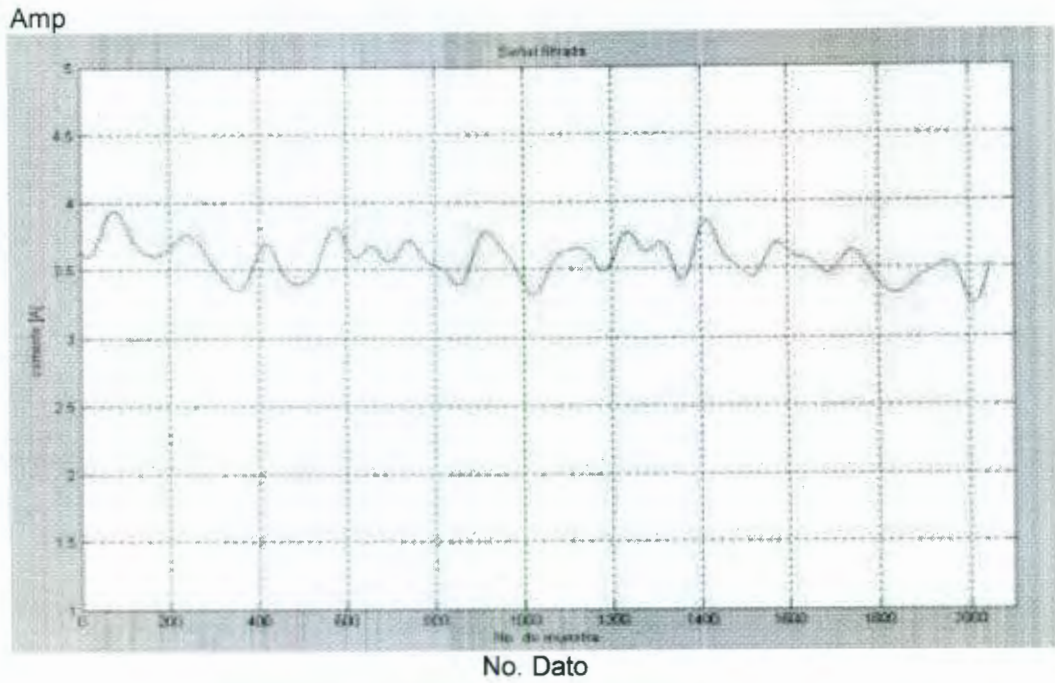


Fig. 3.22 Señal de una broca con daño de 0.42 plg.

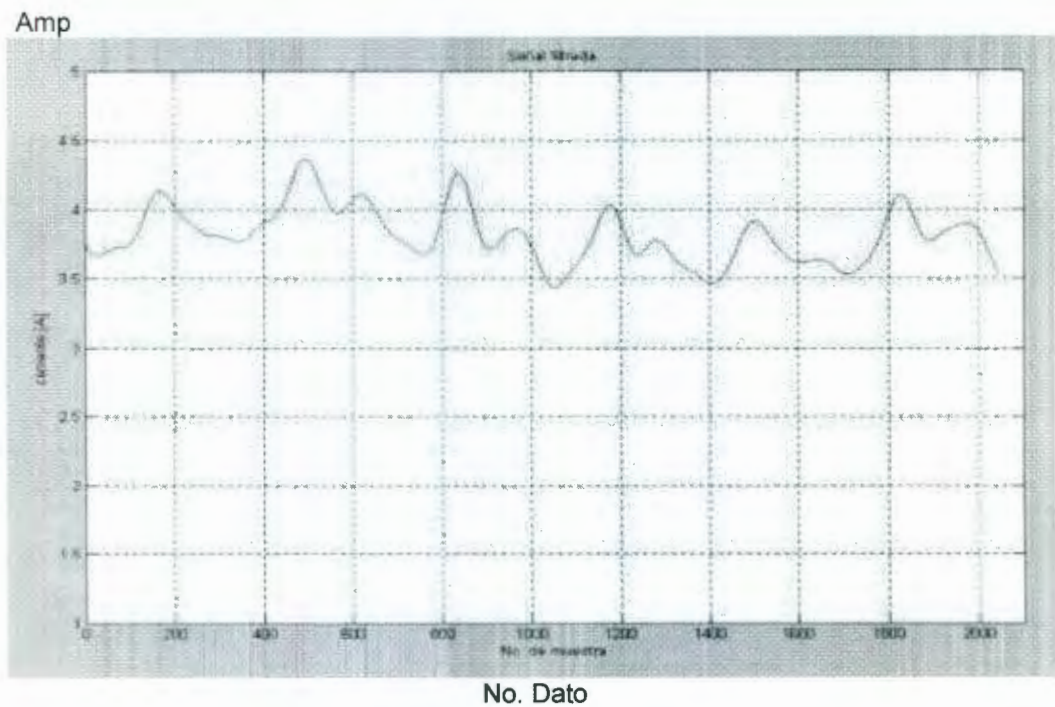


Fig. 3.23 Señal de una broca con daño de 1.76 plg.

3.4 ASIMETRÍA COMO CLASIFICADOR

El método propuesto para proporcionar un parámetro para evaluar la condición de la herramienta de corte en el proceso de taladrado, se basa en una autocorrelación no lineal para medir la asimetría entre las formas de onda de las fuerzas de corte producida por la broca y monitoreada en el controlador del husillo.

El método propuesto estima la diferencia de la señal muestreada de un pulso a otro. Durante el taladrado normal, con la broca en buenas condiciones, los pulsos de la señal son muy similares y la asimetría es muy cercana a cero. Caso contrario sucede cuando el desgaste de la broca se incrementa, donde también la diferencia de los pulsos se hace mas diferente la asimetría crece de modo no lineal.

3.4.1.- Detección de daño en herramienta

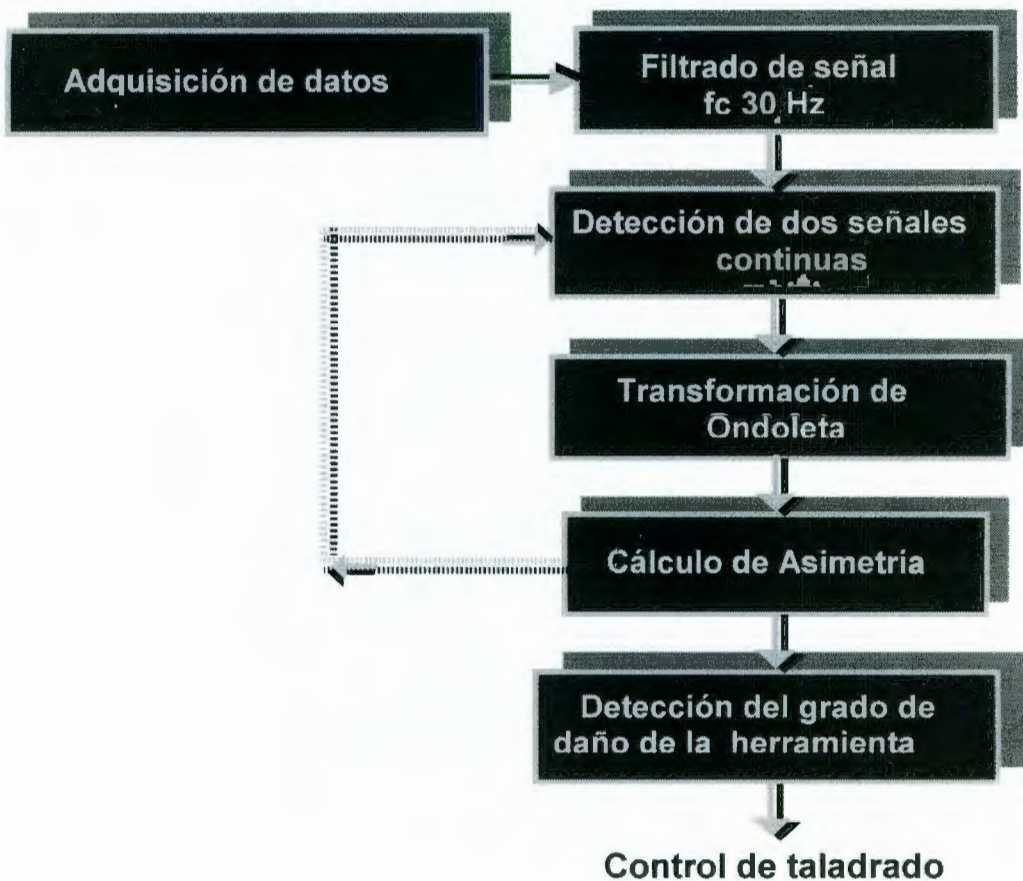


Fig. 3.24 Modelo para la detección de ruptura de la herramienta por Asimetría

El algoritmo completo para la detección de ruptura de la broca (Fig. 3.24), abarca lo procesos intermedios de:

- Adquisición de datos. Aquí se toma la muestra en línea de las señales de corriente del husillo para su análisis.
- Filtrado. Se usa un filtro pasa-bajas con $F_c=30$ Hz para eliminar el ruido y facilitar el análisis.
- Detección de dos pulsos continuos (Fig. 3.25). Se sincroniza el inicio de la muestra a analizar detectando la primer cresta o valle. De aquí se toman los dos pulsos siguientes.

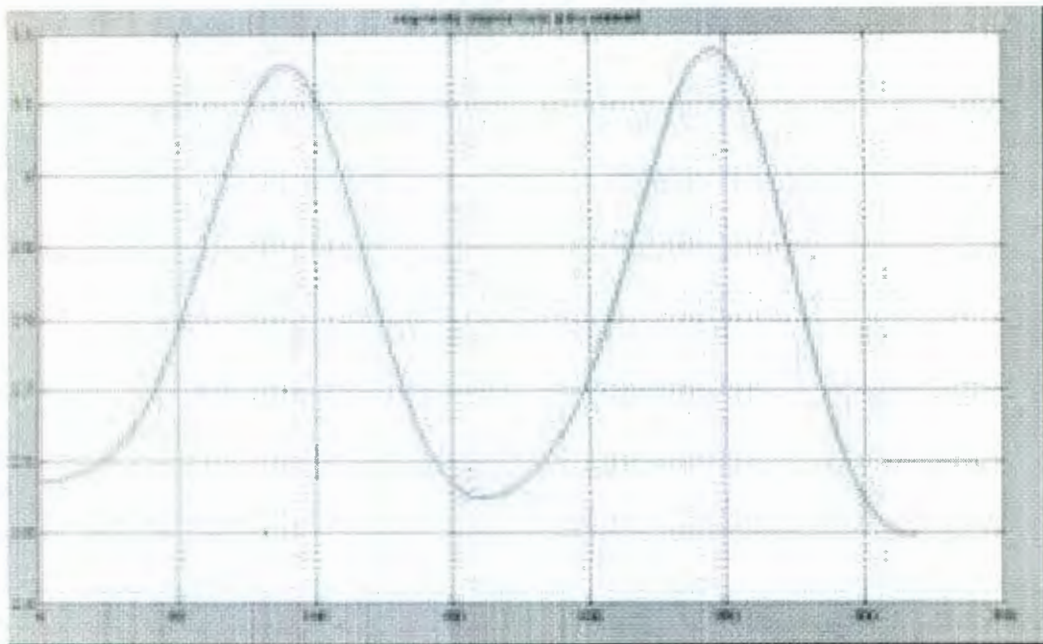


Fig. 3.25 Dos pulsos detectados antes de la Transformación de Ondoleta

- Transformada de ondoleta.
Se aplica la transformada de ondoleta hasta el nivel 4 de manera que la señal original se logra reducir a 20 puntos. Esto permite aplicar la asimetría fácilmente.

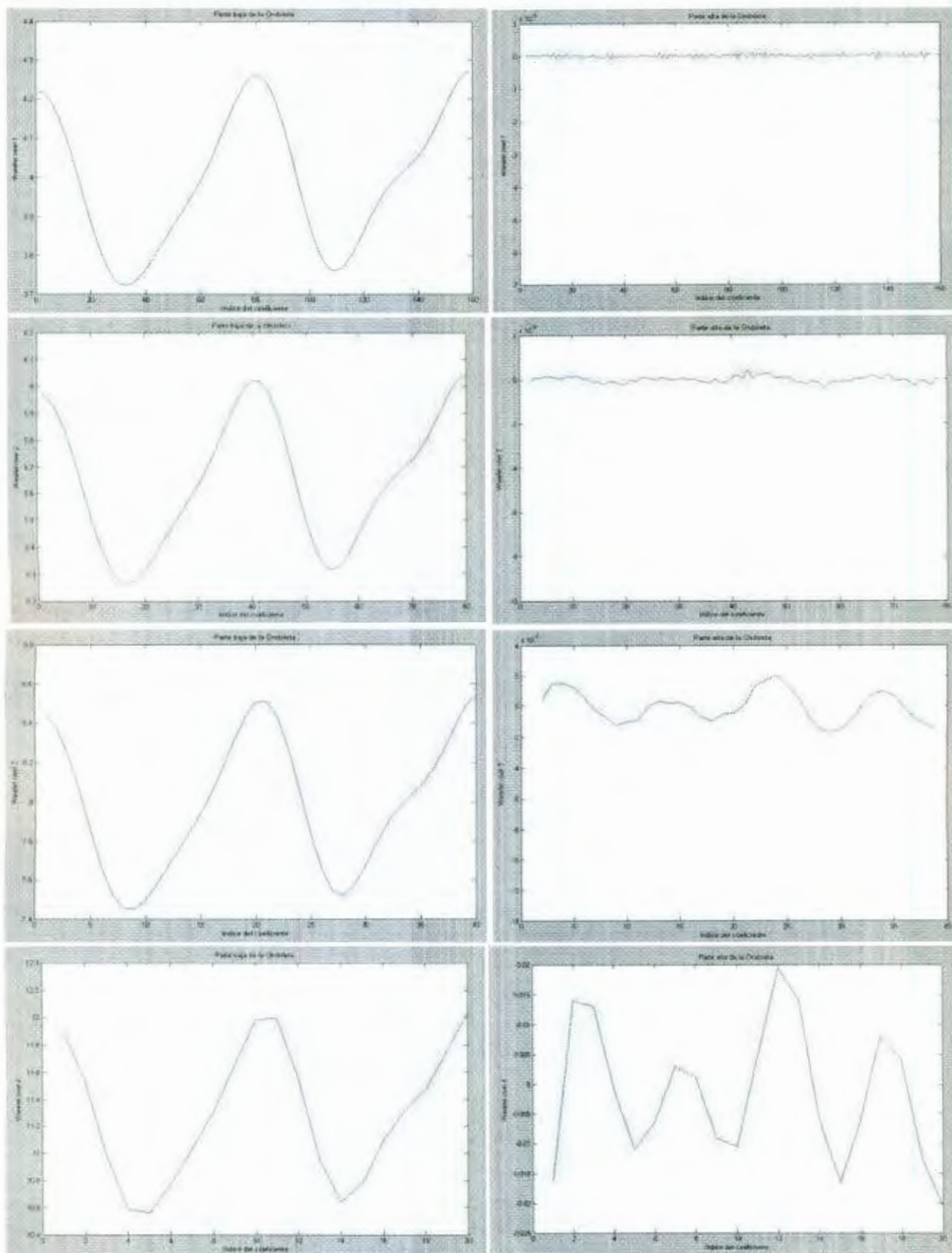


Fig. 3.26 Cuatro niveles de ondas aplicados a la señal de la broca nueva

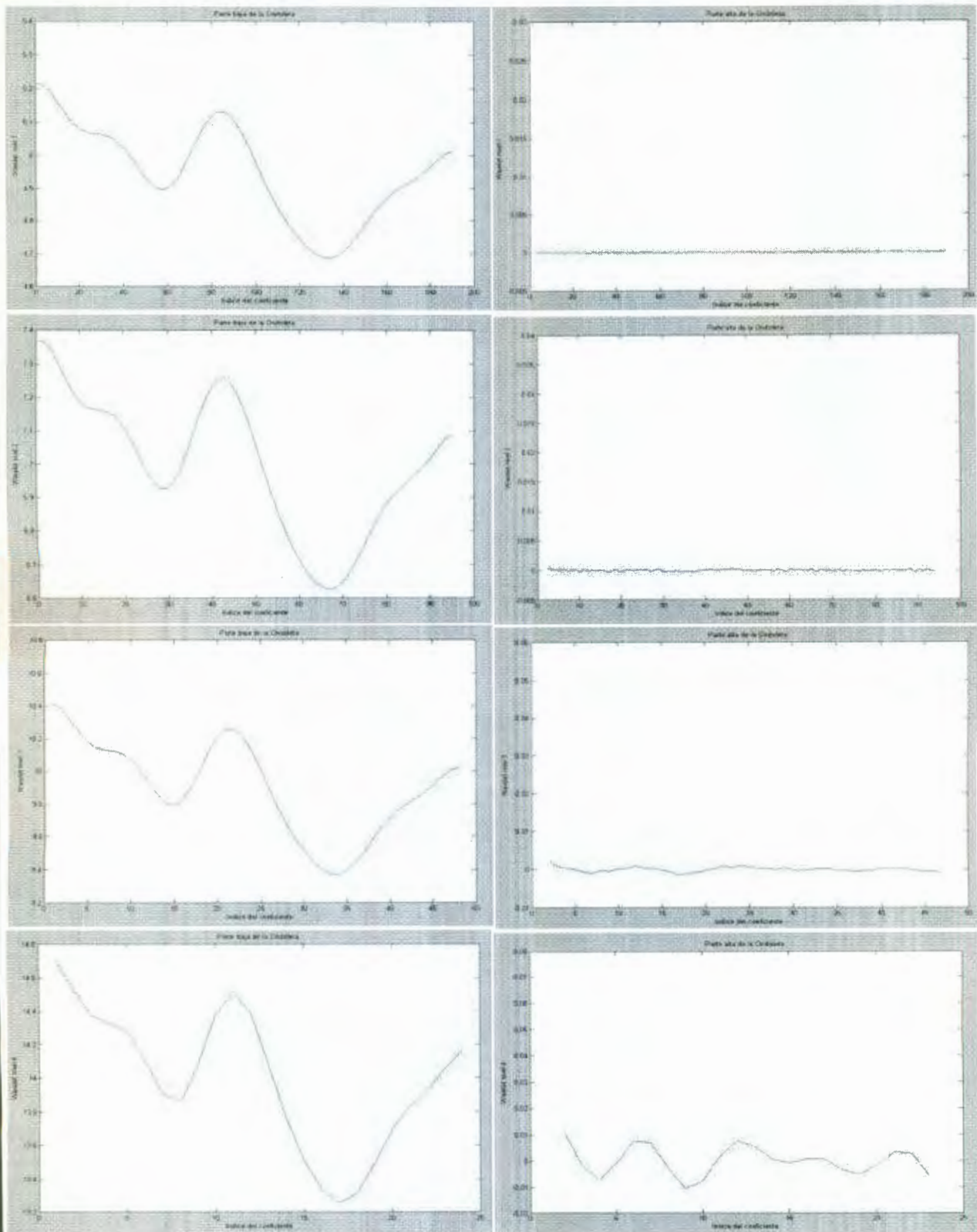


Fig. 3.27 Cuatro niveles de ondasletas aplicados a la señal de la broca con ruptura de 0.42 plg

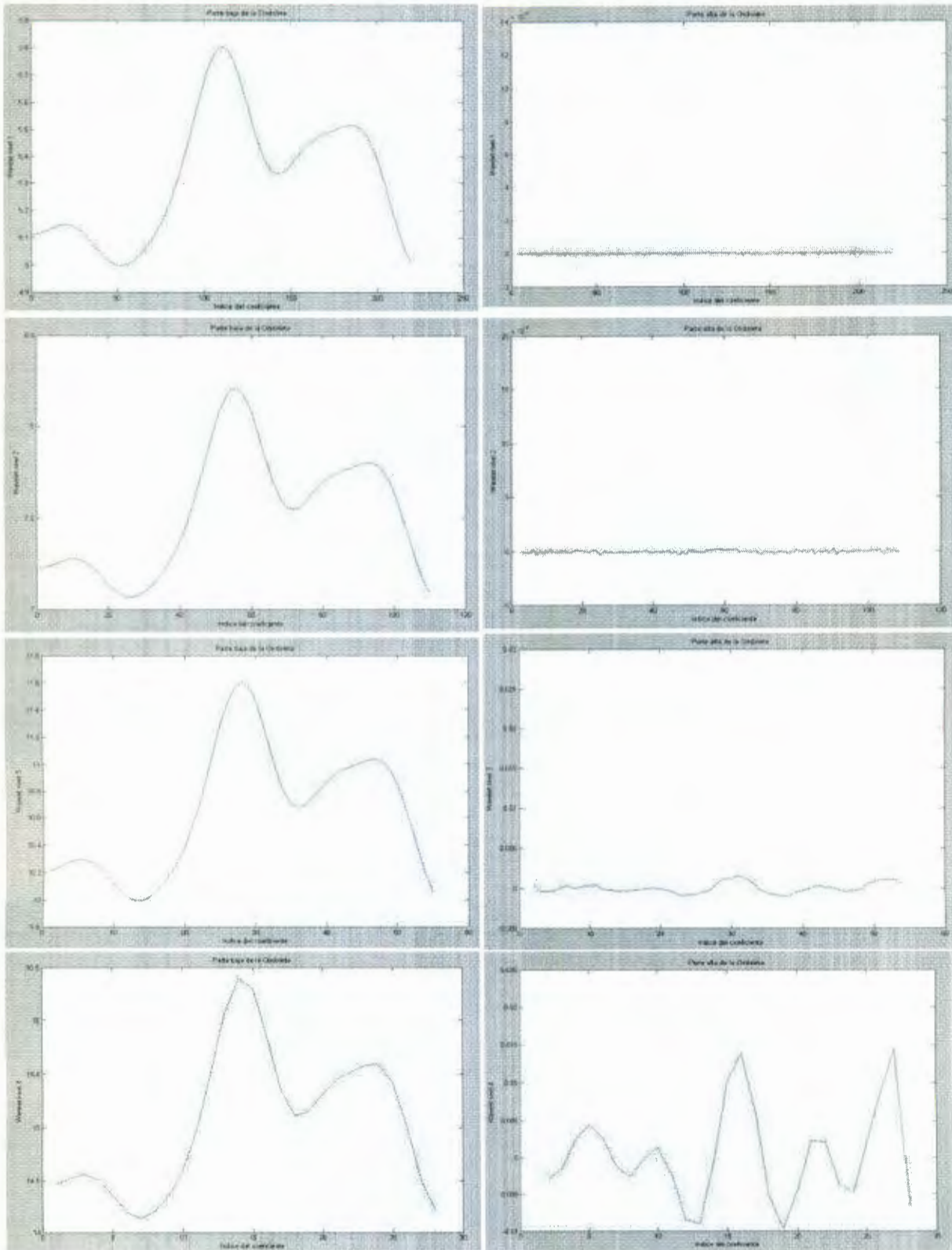


Fig. 3.28 Cuatro niveles de ondas aplicados a la señal de la broca con ruptura de 1.76 plg

- Cálculo de Asimetría (Fig. 3.29).

Se aplica el algoritmo de la asimetría para el punto 1 con el 11, el 2 con el 12 y así sucesivamente hasta el 10 con el 20, con lo cual tenemos 10 valores de asimetría que no permiten identificar la variación del primer pulso contra el siguiente.

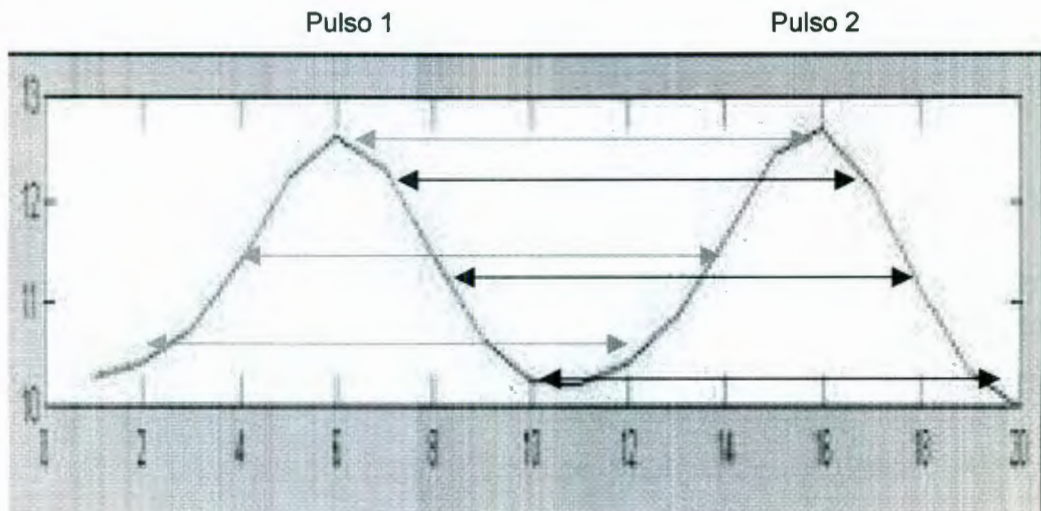


Fig. 3.29 Señal después de la transformación de Ondoleta

- Repetimos los pasos para los siguientes dos pulsos y así hasta concluir el análisis completo de la señal muestreada en el ciclo de taladrado

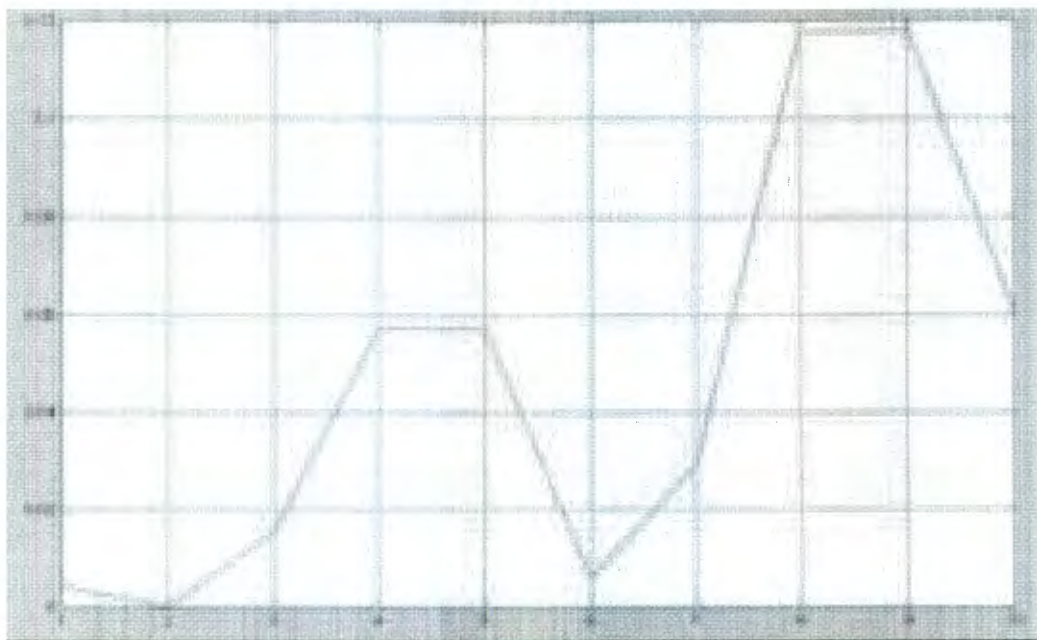


Fig. 3.30 Gráfica con cada componente de la Asimetría

3.4.2 - Cálculo de Asimetría

Para calcular la asimetría aplicamos la siguiente relación:

$$A = \sum_{i=1}^{10} (B_{i+10} - B_i)^2$$

Se aprecia que aún variaciones pequeñas de un punto a otro, son detectadas ya que su diferencia se eleva al cuadrado, lo cual da excelentes resultados en la identificación.

Así para nuestro experimento obtuvimos las siguientes gráficas:

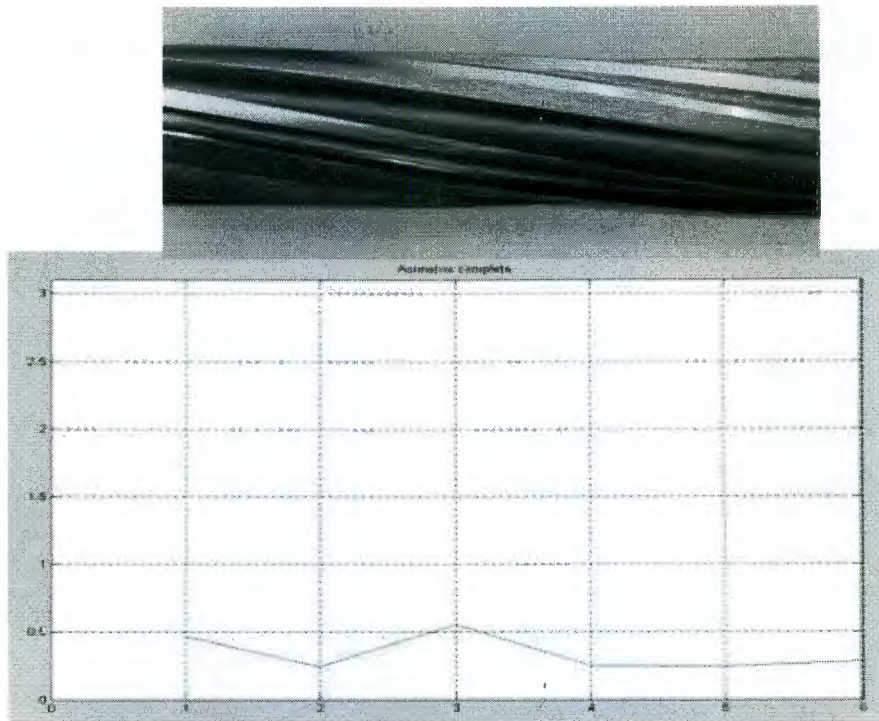


Fig. 3.31 Asimetría de 0.5 máximo para una herramienta nueva

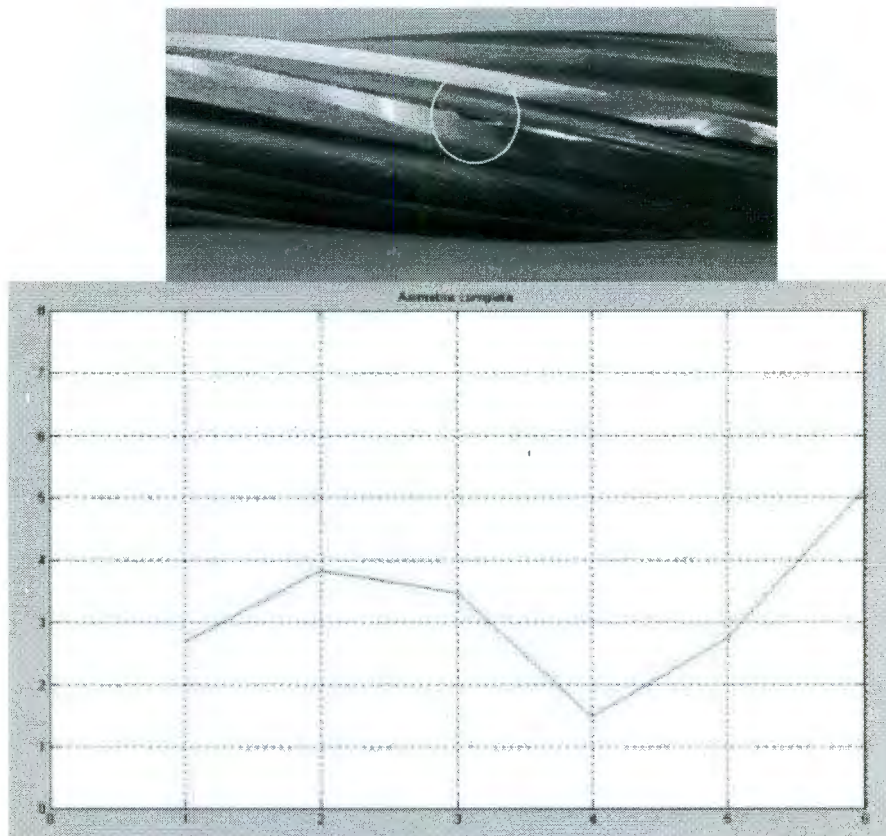


Fig. 3.32 Asimetría de 1.3 máximo para una herramienta dañada 0.42 pulgadas

Aquí se observa en la fotografía un daño en uno de los filos de la broca con una longitud de 0.42 pulgadas.

El valor máximo de asimetría crece a medida que el valor del daño en la herramienta crece también.

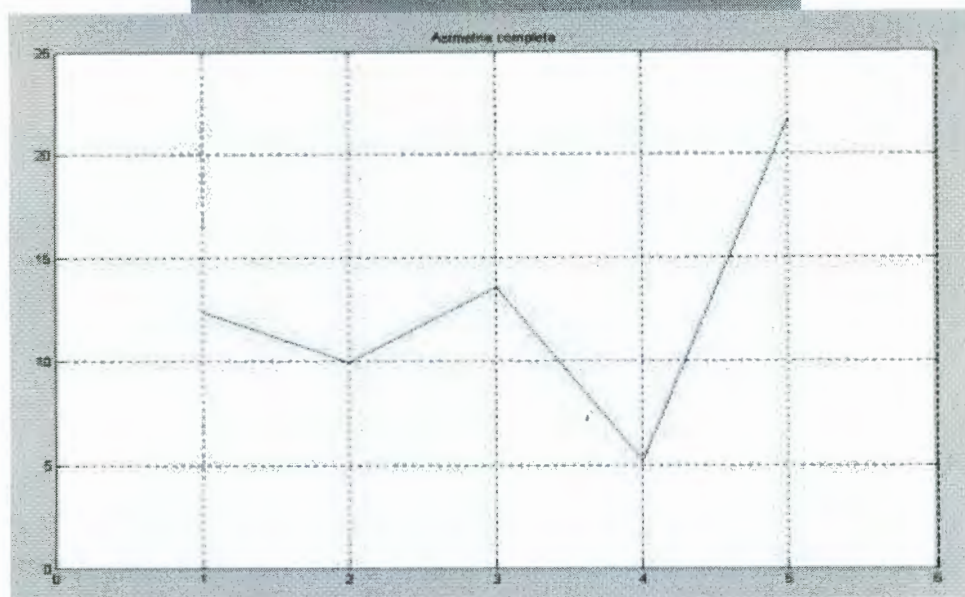
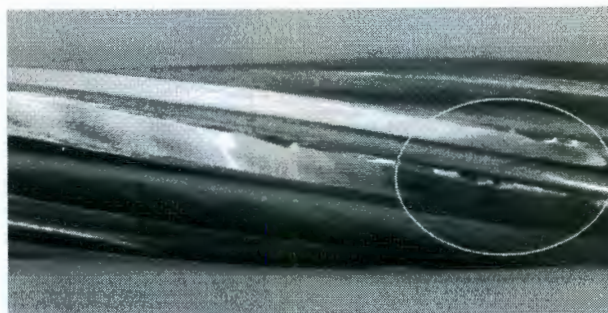


Fig. 3.33 Asimetría de 7.9 máximo para una herramienta dañada 1.76 pulgadas

Aquí se observa en la fotografía un daño en uno de los filos de la broca con una longitud de 1.76 pulgadas.

El valor máximo de asimetría crece en forma no lineal a medida que el valor del daño en la herramienta crece respecto al caso anterior.

Con esto se demuestra que la asimetría está totalmente relacionada con el daño en la broca por lo que la podemos aplicar en la detección de fallas en la herramienta de corte en el taladrado.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El desarrollo del presente trabajo, tiene como resultado aportaciones importantes dentro del área mecatrónica y el proceso de taladrado:

- ❖ Aplicación del algoritmo de Ondoletas con éxito para simplificar el procesamiento de datos de corriente del husillo.
- ❖ Uso de la Asimetría como algoritmo para la detección eficiente del daño de herramientas de corte en el proceso de fresado.
- ❖ Desarrollo de un sistema efectivo cuyo resultado tiene un alto impacto en la productividad de la operación, la calidad del producto y la confiabilidad de la máquina
- ❖ Ofrecer a la industria una solución para el monitoreo de las herramientas económicamente atractivo hasta para la pequeña industria.

4.1 Resultados

La detección de ruptura durante un proceso de taladrado mediante el análisis de fuerzas que se presentan en el desbaste o remoción de material, es la mejor forma de lograr dicha detección, dada la física misma presente en tal proceso. Todas las variables íntimamente ligadas con dichas fuerzas como lo son las corrientes eléctricas demandadas por los servo-motores en el momento del corte de material, reflejan el comportamiento que están teniendo tales fuerzas, y por ende acceder de manera indirecta a la detección de estados de falla.

Se han presentado una gran diversidad de señales mostrando los diferentes comportamientos de los torques generados por los servo-motores durante el proceso de maquinado. Se han aplicado las transformaciones matemáticas estudiadas a éstas señales y los resultados han mostrado que las Ondoletas, son sensitivas al desgaste de la herramienta.

Como cualquier sistema de taladrado, las componentes del sistema completo contribuyen a la calidad del maquinado, no solamente de la broca misma.

Para que la broca tenga mayor vida (No. de ciclos de taladrado), se requiere cuidar la preparación del proceso:

- Para lograr la precisión deseada, debemos seleccionar adecuadamente el porta herramienta según el material a maquinar: tipo chuck hidráulico, tipo giratoria de ajuste cónico y tipo mordaza.
- Dado el avance de la broca, es importante que la pieza de trabajo tenga un soporte adecuado
- Si no existe el enfriamiento apropiado, presión y flujo, la broca se calentará rápidamente. Esto causa que la broca se expanda, lo cual puede causar forzamientos con el barreno provocando daños prematuros.

Lo ideal en la detección del desgaste de la herramientas, es lograr detectar una falla que puede dañar no solo la herramienta sino más elementos de la máquina que pudieran afectar en un futuro su operatividad o su calidad.

La técnica de Asimetría como elemento clasificador, logró obtener resultados muy satisfactorios para el enfoque dado en el presente desarrollo, ya que como se evidenció en el Capítulo de Pruebas y Resultados, que el sistema detecta el desgaste de la broca, sin importar las condiciones del taladrado.

Dado que se está proponiendo como equipo adicional al taladro, una computadora, una tarjeta de adquisición y su software para configurar la adquisición, resultaría fácil la creación de archivos para análisis futuros de la operación de taladrado: estadísticos, costeo de herramientas, programación de cambios de herramienta, base de datos de históricos de corte por modelo, consumos de energía eléctrica.

4.2 DISCUSIÓN

El daño en la broca es el resultado de la interacción mecánica entre la misma y la pieza de trabajo, que remueve partes de material al perforarlo. El daño en la herramienta es un proceso complicado asociado con muchas variables, tales como la composición de la pieza de trabajo y la broca, la temperatura en las áreas de corte de la herramienta y las condiciones de maquinado.

El propósito final del monitoreo de las condiciones de la broca, es determinar cuando debe ser cambiada antes de su rompimiento o antes de que sus condiciones de desgaste puedan afectar el proceso de taladrado y la calidad de la pieza de trabajo.

Un desarrollo relevante fue haber utilizado la medición de corriente en el controlador del husillo, la cual resulto ser una medida indirecta de la fuerza de corte de la broca.

Para la adquisición de las señales de corriente se usó una tarjeta de adquisición y una computadora portátil (ver 3.2.2 Adquisición de datos), sin embargo la robustez de este sistema depende de la calidad de la computadora y tarjeta de adquisición seleccionadas, por lo que en ambientes industriales exigentes se sugiere el sistema HSP (Hardware Signal Processing) propuesto por Romero T. Rene y Herrera R. Gilberto (2004) por ser un sistema confiable y económico ya que su hardware se configuraría de acuerdo al maquinado en cuestión.

Una limitante en relación a la adquisición de la señal de corriente a través del drive del husillo, es el posible traslape espectral que se daría cuando la componente principal de la fuerza de corte se encuentre muy cerca de la componente principal de la corriente de control. Sin embargo para el caso del taladrado, el objetivo principal de la detección de la ruptura de la broca se cumplió satisfactoriamente.

La transformada de Ondoleta permitió filtrar y comprimir los datos para su posterior procesamiento, con lo cual se demostró que la asimetría de la Ondoleta resulta suficiente para detectar ruptura, y hasta cierto grado desgaste de la broca.

De las pruebas efectuadas también se puede resaltar que con el algoritmo de Asimetría también se puede detectar el desgaste aunque con ciertas limitaciones ya que nuestro método es indirecto, lo cual significa que la precisión de la medición del desgaste es menor que el de un método directo.

4.3 CONCLUSIONES

La transformación de Ondoleta es una herramienta de análisis útil para el procesamiento de señales de corte en los procesos de taladrado para la detección de la falla o condición de la broca.

Durante la experimentación del proceso de taladrado se usaron condiciones reales de operación sin arriesgar las piezas de trabajo, por su alto costo, ni la máquina.

La medición de la corriente del husillo es una señal que indirectamente se relaciona con una falla en la broca. Aunque esta señal es afectada por las condiciones de corte, el material de la pieza de trabajo y el tipo de herramienta, resultó que siempre se detectó la falla de la herramienta aplicando el algoritmo de Asimetría.

En la figura 4.1 se graficó el valor de Asimetría máximo en cada uno de los ciclos de taladrado realizados. En el ciclo 12 el material salió de los límites de calidad requeridos por lo que se necesitaba cambio de broca por las rupturas que presentaba, pero se realizaron dos ciclos más para evaluar los niveles de Asimetría. Para valores de Asimetría menores a 6 (de la línea punteada hacia abajo) el material es correcto y no se

requiere cambio de broca. Para valores de Asimetría mayores a 6 (de la línea punteada hacia arriba) ya se requiere cambio de broca por que el barreno en la pieza no es de la calidad solicitada. En la operación normal ya no requerirá el operador de verificar la calidad en la pieza porque con el cálculo de Asimetría se puede detener el taladrado. De aquí se visualiza que del comportamiento de la Asimetría podemos determinar, cuando conviene hacer un cambio de herramienta según su afectación a la calidad del taladrado en la pieza.

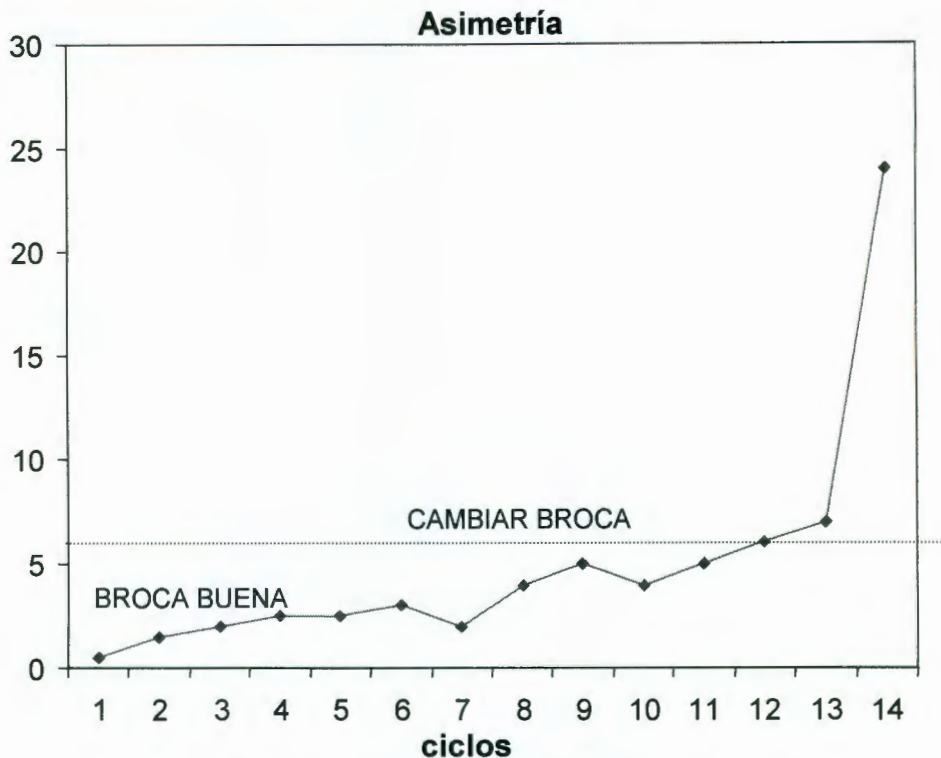


Fig. 4.1 Comportamiento del valor de Asimetría

La propuesta planteada tiene un costo aproximado de 3,000.00 USD, el cual es competitivo comparado con las soluciones actuales de la industria, tales como el Brankamp de Siemens y el Montronix, con precios superiores a los 10,000.00 USD, sin

considerar el poco servicio técnico que se ofrece en México, Romero T. Rene, Herrera R. Gilberto (2004).

La siguiente etapa del presente trabajo es desarrollar un sistema experto que conduzca a un sistema inteligente de control para los taladros de Control Numérico, que tenga la capacidad de ajustar automáticamente las velocidades de giro del husillo y avance de la broca ó decidir detener la operación de la máquina en función de la condición de la herramienta.

Literatura Citada

- Altintas Yusuf. 2000. Manufacturing Automation, metal cutting mechanics, machine tool vibrations and CNC design. Cambridge University Press. New York.
- Braun S., Lenz E. 1996. Machine tool wear monitoring, Mechanical signature analysis, Theory and Applications. Academic Press Ltd.
- Cardanes, S.A. de C.V. 2000. SIEM 2000 Report. Integral System for Maintenance Evaluation.
- El-Wardany T.I., Gao D., Elbestawi M.A. 1996. Tool condition monitoring in drilling. International Journal of machine tools.
- Herrera Ruiz Gilberto, Manriquez Yépez José, Hernández Pérez Oscar. 1996. Monitoreo y procesamiento de las señales de corte presentes en un proceso de fresado. Memorias, Tomo I.
- Hayashi S.R., Thomas C.E., Wildes D.G. 1998. Tool break detection by monitoring ultrasonic vibration. Annals of the CIRP 37.
- Jantunen E., Jokinen H. 1996. Automated On-line diagnosis of Cutting Tool Condition. Flexible Automation and Integrated Manufacturing. Integrated Monitoring Diagnostics & Failure Prevention, Technology Showcase, 50th MFPT, Mobile, Alabama, 259-268.

Kailath T. 1980. *Linear Systems*. Prentice Hall Englewood Cliffs.

Konig W., Christoffel K. 1990. Sensors for drilling machines. *Industrie Anzeiger*.

Lin S.C., Ting C.J. 1995. Tool wear monitoring in drilling using force signals. *Wear* 180 (1-2) 53-60.

Quadro A.L., Branco J.R.T. 1997. Analysis during drilling test. *Surface & Coating Technology*.

Radhakrishnan T., Wu S.M. 1991. On-line hole quality evaluation for drilling. *Engineering for Industry*.

Ramamurthi K., Hough J.R.C.L. 1993. Intelligent real-time predictive diagnostic for cutting tools. *Engineering for Industry*.

Romero T. Rene, Herrera R. Gilberto. 2004. Procesamiento de señales para la detección de ruptura de herramientas en sistemas de Manufactura por Control Numérico Computarizado. Universidad Autónoma de Querétaro.

Routio M., Saynatjoki M. 1995. Tool wear and failure in the drilling of stainless steel. *Materials Processing Technology*.

Schehl, U. 1991. Werkzeugüberwachung mit Acoustic-Emission beim Drehen. Fräsen und Bohren, Aachen.

Subramanian K., Cook N.H. 1997. Sensing of drill wear and prediction of drill life. *Journal of Engineering for Industry*.

Thangaraj A., Wright P.K. 1998. Computer-assisted prediction of drill failure. *Journal of Engineering for Industry*.

Xiaoli, Li. 1999. On-line detection of the breakage of small diameter drills using current signature wavelet transform. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 39 (1) 157-164.

Xiaoli Li, Dong S., Yuan Z. 1999. "Discrete Wavelet Transform for Tool Breakage Monitoring". *Machine Tool & Manufacture Pergamon*.

Apéndice

A. Programa de Matlab para filtrar las señales muestreadas

```

clear;                % parámetros del filtro

fc = 30;              % frecuencia de corte en Hz
fs = 50;              % frecuencia de paro
Sp = 0.002;           % atenuación de rizo en banda de paso
Ss = 0.001;           % atenuación de rizo en banda de rechazo

Ap = -20*log10(1-Sp); % atenuación en dB
As = -20*log10(Ss);
Wp = 2*pi*fc/8000;    % frecuencias normalizadas
Ws = 2*pi*fs/8000;

[N, Wn] = ellipord(Wp, Ws, Ap, As); % definición del filtro

[b, a] = ellip(N, Ap, As, Wn);

load ciclo01.asc;     % carga de datos
datos = ciclo01(:,2);

yf = filter(b, a, datos); % filtrado de datos

figure(41);
plot(datos(256*94:256*102-1));

figure(1);
subplot(211);         % muestra la señal seleccionada

plot(yf(256*94:256*102-1));
title('Señal original');

grid;

```

B. Programa de Matlab para seleccionar el rango a analizar de la señal del taladrado

```

y = (yf(256*70:256*78-1))';
N1=20000;
y = (yf((256*70+N1):(256*78-1)+N1))'; % Toma un segmento de
                                         % la señal
N = length(y);                          % filtrada de longitud N
i = 1;
m = y(i+1) - y(i);                       % Calculo de pendiente inicial
if (m >= 0)                               % Si m es positiva busca
    p = 1;                                % la primera cresta
    while (p==1)
        i = i + 1;
        m = y(i + 1) - y(i);
        if (m < 0)                         % detecta cambio de pendiente
            inicio = i;                   % Asigna punto inicial
            p = 0;                         % Asigna pendiente inicial
        end
    end
else                                       % Sino busca el primer valle
    p = 0;                                 % y determina el punto de
    while (p==0)                           % inicio del análisis
        i = i + 1;
        m = y(i + 1) - y(i);
        if (m >= 0)                       % Detecta cambio de pendiente
            inicio = i;                   % Asigna punto inicial
            p = 1;                         % Asigna pendiente inicial
        end
    end
end
end

h = 1;                                    % inicializa variables usadas
pa = p;
ps = 0;
i = inicio;
pt = inicio;
%min = 80;                                % Numero mínimo de puntos para
                                         % considerar el cambio de m
min = 0.1;                                % Amplitud mínima aceptable para
                                         % aceptar cambio de m
while (i < (N - 1))                       % Ciclo de análisis hasta final
                                         % de señal
    while (p == pa) & (i < N)             %Busca los cambios de pendiente
        m = y(i + 1) - y(i);
        if (m < 0)
            pa = 0;

```

```

if (pa ~= p)          % Si hay un cambio de pendiente
    av = abs(y(i)-y(pt)); % lo analiza para validarlo
    if (av < min)      % El cambio NO es valido
        p = pa;        % y continua buscando
        %pt = i;
    else               % El cambio SI es valido
        pt = i;        % cambia la distancia de
                        % tolerancia
    end                % y termina ciclo de búsqueda
end
else
    pa = 1;
    if (pa ~= p)      % Si hay un cambio de pendiente
        av = abs(y(i) - y(pt)); % lo analiza para
                                % validarlo
        if (av < min)  % el cambio NO es valido
            p = pa;    % y continua buscando
            %pt = i;
        else           % El cambio SI es valido
            pt = i;    % cambia la distancia de
                        % tolerancia
        end            % y termina ciclo de busqueda
    end
end
i = i + 1;
end

ps = ps + 1;          % Lleva el conteo de cambios de
                    % pendiente
if (ps < 4)           % Si es menor de 4 cambios,
                    % sigue buscando
    p = pa;
else                  % A los cuatro cambios de
                    % pendiente
    final = i - 1;   % define el final del segmento a
                    % tratar

```


C. Programa de Matlab para calcular la ondoleta de la señal monitoreada

```

figure; % muestra el segmento de análisis
plot(y(inicio:final));
title('segmento original listo para wavelet');
grid;

[af, sf] = farras; % banco de filtros para análisis y
                  % síntesis

x = y(inicio:final-1); % carga señal filtrada

wv = dwt00(x,4,af); % Aplica la wavelet haciendo una
                   % llamada a la función dwt00 con los
                   % siguientes parámetros:
                   %           x es el vector a tratar
                   %           4 es el numero de niveles
                   %           af es el filtro aplicado
                   % Esta función hace un llamado a la
                   % función af

figure; % Muestra los niveles de wavelet

subplot(511); % Las graficas no están normalizadas
plot(wv{1});

title('Niveles de la wavelet');
subplot(512); % Los datos de cada nivel se guardan
plot(wv{2}); % en las variables wv{n}

subplot(513);
plot(wv{3});

subplot(514);
plot(wv{4});

subplot(515);
plot(wv{5});

L = length(wv{5});
fprintf(' No. de puntos Wavelet(5)%d\n',L)

```

D. Programa de Matlab para calcular la Asimetría de la señal del taladrado

```

k = fix(L/2);
                                % Realiza la asimetría (comparación)
    for j=1:k;                    % del ultimo nivel de la ondoleta
        d(j) = (wv{5}(k + j) - wv{5}(j))^2;
    end
A{h} = d;                        % Guarda el vector asimetría del
                                % segmento en la variable A{h}
figure;                          % y lo grafica
plot(d);
grid;
title('Asimetría del segmento');

i = i + 1;                       % Reinicializa variables para
                                % comenzar el proceso de búsqueda de
p = pa;                          % pendientes
ps = 0;
inicio = final;
h = h + 1;
clear d;
clear x;

h = h - 1;
As = 0;
    for j = 1:h,                 % concatena los vectores de
                                % asimetría
        As = cat(2,As,A{j});
    end
figure(1);                       % muestra la asimetría completa de
                                % la señal cargada
subplot(212);
plot(As);
title('Asimetria completa');
grid;

```

E. Programa de Matlab para graficar la Ondoleta Madre

```

%%%%%%%%%%
u=-4:0.01:4;
fi=exp(-u.*u)/sqrt(2*pi);
g=u.*exp(-u.*u)
figure(1)
plot(u,fi);
axis([-4, 4, 0, 0.5])
xlabel('u');
ylabel('fi(u)')
grid on
title('Ondoleta Madre, Gaussiana')
figure(2)
plot(u,g);
axis([-4, 4, 0, 0.5])
xlabel('u');
ylabel('fi(u)')
grid on
title('Ondoleta Madre')

```

F. Programa de Matlab para graficar ejemplos

```

% Calculo de ejemplos
%%%%%%%%%%
clear all
u=(-1:0.001:1)';
fs=1000;

```

```

N=length(u);
N1=975;
w=zeros(N,1);
w(N1:(N-N1),1)=ones(N-2*N1+1,1);
f=exp(-15*u.*u).*sin(2*pi*6*u)+0.3*randn(N,1);
kfs=(0:(N-1))*fs/N;
;%.*sin(2*pi*60*u) + 0.25*randn(N,1);

F=fft(f);
figure(1)
subplot(2,1,1)
plot(u,f)
grid on
title('Señal original');
xlabel('u [s]');
ylabel('f[u]');
subplot(2,1,2)
plot(kfs-fs/2,fftshift(abs(F))/N)
grid on
title('Transformada de Fourier');
[cAo,cDo] = dwt(f,'db1');
[cA,cD] = dwt(cAo,'db1');

Nw=length(cA);
xlabel('frecuencia [Hz]');
ylabel('Abs(F(jw))');

figure(2)
subplot(2,1,1)
plot(1:Nw,cA)
xlabel('No. de muestra');
ylabel('cA');

```

```

    title('Transformada de Ondoleta, Coeficientes de
Aproximacion')
    grid on

    subplot(2,1,2)
    plot(1:Nw,CD)
    xlabel('No. de muestra');
    ylabel('CD');
    title('Transformada de Ondoleta, Coeficientes de
detalle')
    grid on
    figure(3)
    No=64;
    kfs=(0:(No-1))/No*fs;
    for i=1:30,
        T(i)=u(i*No);
        fw=f((i-1)*No+1:(i*No));
        Fw(:,i)=fft(fw);
        G(:,i)=fftshift(Fw(:,i));
        hold on;

    end
    [X,Y]=meshgrid(T,kfs-fs/2);
    surf(X,Y,20*Log10(abs(G)+1))
    colormap hsv
    axis([-1 1 -500 500 0 35])
    grid on
    title('Transformada de Fourier con Ventana');

```

TOOL FAILURE MONITORING SYSTEM FOR DRILLING MACHINES

Wbaldo Leal Tafolla

Cardanes, S.A., SPICER
Acceso III No.3 Fracc. Ind. Juárez
76120 Querétaro, Qro.
wleal.cardanes@spicer.com.mx

René Romero Troncoso

Electronics Department
FIMEE – U. De Guanajuato
Tampico 912, Col. Bellavista
troncoso@salamanca.ugto.mx

Gilberto Herrera Ruiz

UAQ Querétaro State University
C.U. Cerro de las Campanas
76010 Querétaro, Qro.
gherrera@sunserver.uaq.mx

Abstract

It is well known that on-line tool condition monitoring has great significance in modern manufacturing process. To prevent possible damages to the work piece and machine tool, reliable techniques are required for providing a rapid response to an unexpected tool failure. Drilling is one of the most fundamental machining operations. There are many practical problems in drilling, one of the most crucial issues is wear in drill. During the cutting processes, spindle motor current is related to the tool condition. Less power is consumed, for a same tool feed, when it's used a sharp tool compared to a wear tool, this variance can be exploited for on-line tool breakage monitoring. The mathematic tool used after the signal analysis applied with wavelet transformation, is the Symmetry because is enough and precise for tool condition diagnostic in drilling.

1. Introduction

Beside the raw material, cutting tools represent the highest cost of the production process on manufacturing industry. Failure detection, before it affects the product quality or damages the machine, will improve the production process efficiency. A good cutting tool selection improves the number of parts per time unit and the quality, avoiding production breakdowns by cutting tool faults and machine damages. Breaking, wear and collisions of cutting tool are most common causes of production process breakdowns on tool machines. According with an analysis made at Cardanes, S.A. [1], failures are produced by: dimension mistakes on forge or foundry (3%), programming mistakes(13%), wrong tools (18%), operation mistakes (20%), tool set up (21%) and CNC electric faults (25%). Cardanes spend 15,000 USD per month on drilling tools, and the cost can be reduced by monitoring the cutting process and by

taking correction actions before it affects the production process.

2. DETECTION SYSTEM

Early detection of drill wear and breakage has particular practical relevance, not only for minimizing tool damage and machine downtime, but also for avoiding more serious consequences such as damage to the tool –head.

The present research has obtained good results in detecting faults in a drill, using linear mathematics transformations applied to the current-voltage signals from the spindle driver at the servomotor. Current measurement at the servomotor drivers is an indirect measurement of the drilling force [2], so the information obtained is reliable. A similar approach can be used for other cutting tools without any problem. A diagram for the drilling process is shown on fig. 1.

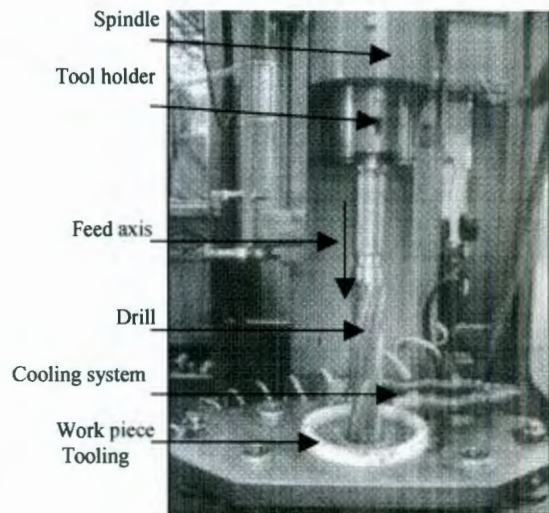


Fig. 1 Drilling Process

3. Data Acquisition

For monitoring the drilling signals, it was used a National Instruments Data Acquisition Board with a Programmable Peripheral Interface (PPI) MSM82C55. It has 24 digital lines on three ports, A, B y C.

Data Acquisition board has next characteristics,

- Model: DAQCard-1200.
- Connectors: 68 pins PCMCIA for computer port and 50 pins connector for input/output signals.
- 8 analog inputs for "simple mode" or 4 input on differential mode
- 2 analog output $\pm 5V$ bipolar or 0-10 V unipolar
- Sampling rate: 120 ks/s

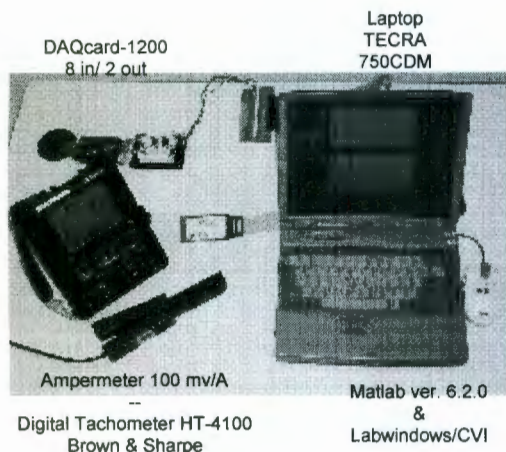


Fig. 2 Equipo usado para la adquisición de las señales

On this work, additional sensors were not used. Direct current signals from the controller outputs were monitored. Because of spindle requirement, constant torque, we use the controller on torque mode.

4. Signal Analysis Tools

Signal conditioning is performed by an 8th order digital Chebyshev filter stage with a cut-off frequency of 30 Hz. This filter removes non relevant signals, such as noise and servo control current, which are out of the active region of the cutting signal. The digital filter stage simplifies the digital processing of the signals on subsequent stages and it also provides reliable information for the acquisition system.

The data acquisition system converts the analog signal into digital for further analysis. The interface stage transfers the information from the data acquisition system to the computer. Here the wavelets transformation [3]-[4] is applied and they are analyzed by the Asymmetry mathematic algorithm [5]-[6]. With this information a diagnostic is obtained to take decisions depending on the cutting tool damage, and determine if machining operation can continue or should be stopped to perform a corrective action.

The Discrete Wavelet Transform (DWT) was obtained with equations 1-2 [7]:

$$d_{j+1,k} = \sum_{i=-\infty}^{\infty} h(i-2k) d_{j,k} \quad (1)$$

$$c_{j+1,k} = \sum_{i=-\infty}^{\infty} g(i-2k) d_{j,k} \quad (2)$$

The coefficients $d_{j,k}$ represent the lower frequency approximations of the original signal, and the wavelets coefficients $c_{j,k}$ represent the distribution of higher frequencies.

Implementation of the DWT requires a choice of low-pass and high-pass filters (wavelets) h and g in equations (1-2) and formulation of matrix equations based on the number N of samples (320 samples) in the input signal $d_{j,k}$.

The wavelet filters adopted determine the quality of the wavelet analysis. It was used the length 4 Daubechies system of wavelets, because it has the advantages of orthogonality, compact support in the time domain and computational simplicity. The filters employed are:

$$h[] = [0.482962913, 0.836516303, 0.221413868, -0.129409522], \quad g(n) = (-1)^n h(3-n)$$

The number N of input data points is reflected in the size $N*N$ of the wavelet transformation matrix T , which is a function of the filters h and g in equation 3.

$$T = \begin{pmatrix} h_0 & h_1 & h_2 & h_3 & & & & \\ g_0 & g_1 & g_2 & g_3 & & & & \\ & h_0 & h_1 & h_2 & h_3 & & & \\ & g_0 & g_1 & g_2 & g_3 & & & \\ & & \dots & \dots & & & & \\ & & & h_0 & h_1 & h_2 & h_3 & \\ & & & g_0 & g_1 & g_2 & g_3 & \\ h_2 & h_3 & & & h_0 & h_1 & & \\ g_2 & g_3 & & & g_0 & g_1 & & \end{pmatrix} \quad (3)$$

So, the wavelet transform is given by

$$\begin{pmatrix} d_{j+1,1} \\ c_{j+1,1} \\ d_{j+1,2} \\ \dots \\ d_{j+1,N/2} \\ c_{j+1,N/2} \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} d_{j,1} \\ d_{j,2} \\ d_{j,3} \\ \dots \\ d_{j,N-1} \\ d_{j,N} \end{pmatrix} \quad (4)$$

The figure 3 shows the signal processing flow diagram for the drill failure system and classification. Due to the time-frequency location properties, DWT has proved to be an appropriate starting point for the classification of the signals from interface [2]. It is assumed throughout this paper that drill damage classification routine is done by Asymmetry Algorithm.

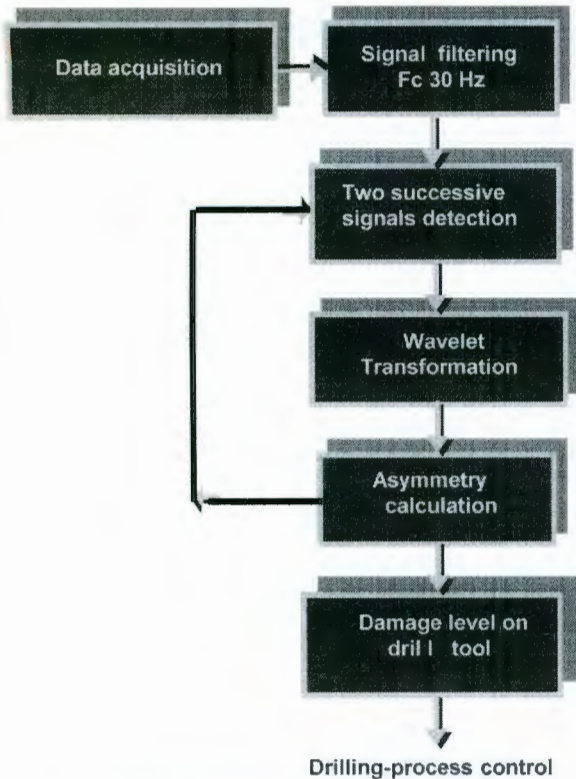
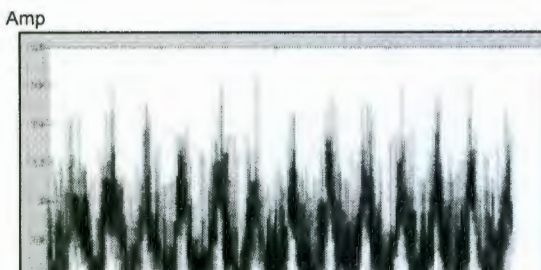


Fig. 3 Signal Processing flow for drill damage detection

5. Asymmetry

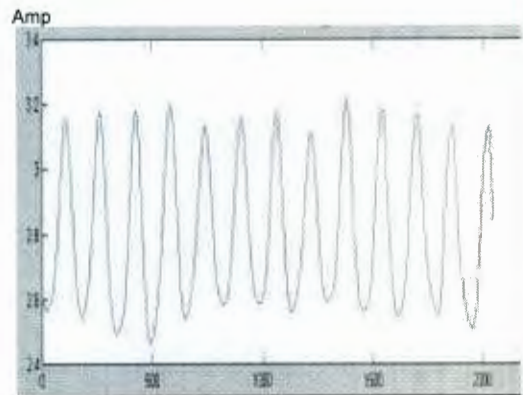
The algorithm for the drill damage detection, include next processes:

- Spindle current data acquisition.



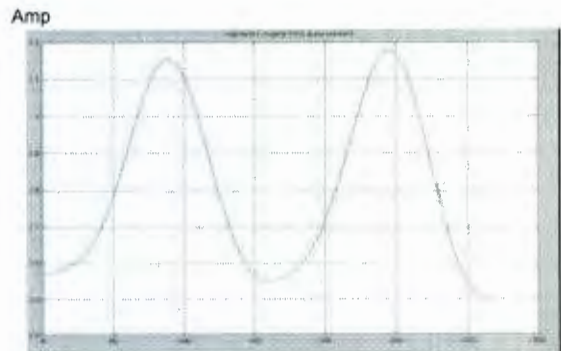
Point No.
 Fig. 4 Current signal from the drive

- Filter. We are using a low-pass filter with $F_c=30$ Hz for noise elimination.



Point No.
 Fig. 5 Current signal after the filter

- Two continuous pulse detection. It was detected the first slope direction change (from + to -, or - to +). From here, we identify next two pulses to be analyzed and so on.



Point No.
 Fig. 6 Two pulses detected before Wavelet Transformation

- Wavelet transformation. It was applied wavelet algorithm through level 4, so from a 320 points for original signal at the end we

have a 20 points signal. On this signal it's easy to apply the Asymmetry Algorithm.

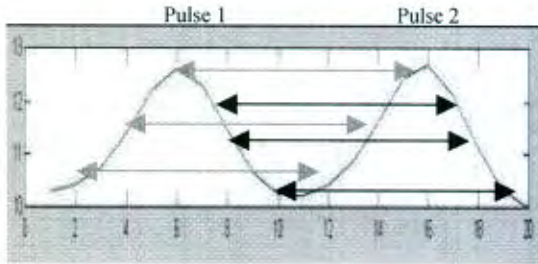


Fig.7 Signal after wavelet transformation

□ Asymmetry algorithm.

The proposal method for evaluating the tool condition on drilling process, use a non lineal autocorrelation to calculate the symmetry for the cutting signals generated by the drill and monitored on the spindle drive.

The asymmetry calculate the monitoring signal difference from one pulse to another [8]. On normal drilling, with a drill in good conditions, the signal pulses are too similar, so the asymmetry is close to zero.

To calculate the asymmetry it's used next relation,

$$A = \sum_{i=1}^{10} (B_{i+10} - B_i)^2 \quad (5)$$

We can affirm that small variations from one point to another can be detected because their difference it's affected by an exponential of two. The asymmetry increase at non lineal mode.

Equation (5) is applied to the point 1 with 11, 2 with 12, and so on (Fig. 7). At the end the asymmetry is adding up 10 values, see fig. 8.

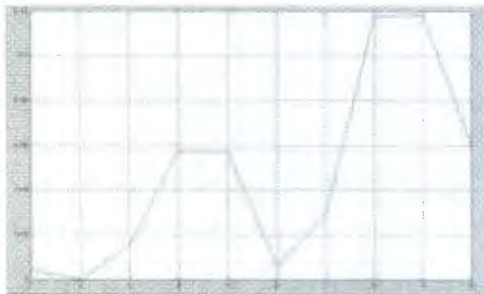


Fig. 8 Graphic for each component on asymmetric calculation

Step described before is repeated for next two pulses until finishing asymmetry evaluation for the monitored signal on drilling cycle.

6. Test and Digital Signals Processing

We use a retrofitted to CNC BAKER-422 drilling machine for testing the system. During test stage several Kennametal drills were selected with different wear grades (Fig 8) and Hocut 931 coolant. This drill is 25 in length, 2.1 in diameter, right cutting.

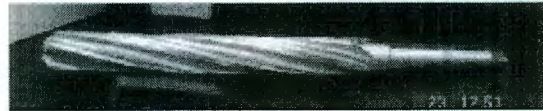


Fig. 9 Kennametal 4440301059 drill used for testing

The piece used for testing was the 8.8 kgs. heavy yoke Cardanes No. 6-3-3441, made with "Pearlitic nodular as-cast Ductile Iron (SAE J434C grade D 7003)". This part is a join between the transmission and the drive shaft on DINA, INTERNATIONAL and MERCEDES BENZ heavy trucks.

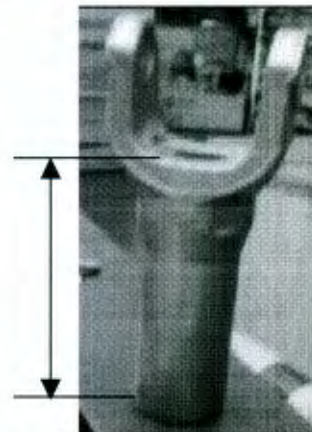
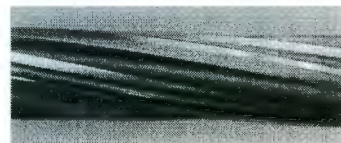


Fig. 10 Heavy yoke used for testing

Next are the machine conditions used for testing. Wearing drill length was checked on a MetroTec Programmable Geometric Readout, model Projectron III.

Wearing of cutting tool	0.0"	0.55"	1.23"
Speed of the tool (spindle)	100 RPM		
Cutting feed	80.0 mm/min		
Cutting depth	254.0 mm		

Next graphics shows asymmetric analysis results.



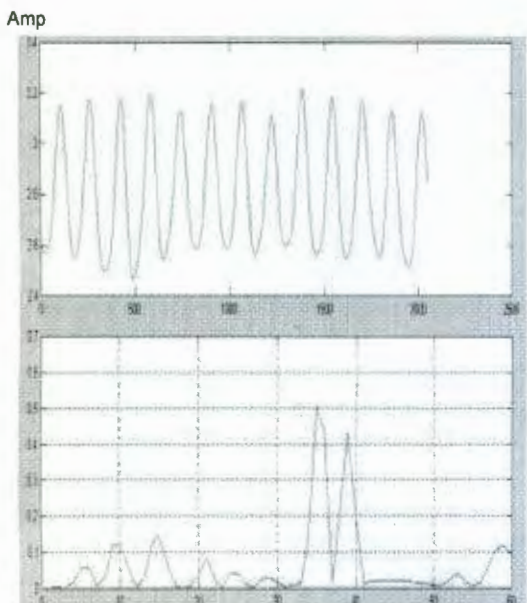


Fig. 11 Original signal and 0.5 maximum asymmetry value for a new drill

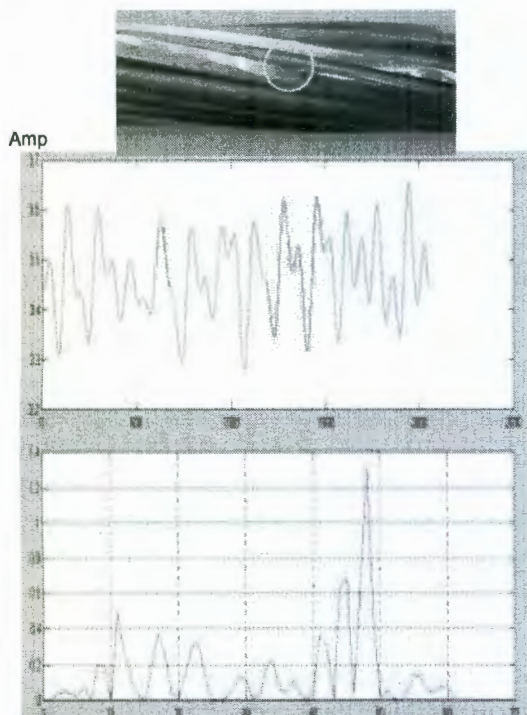


Fig. 12 Original signal and 1.5 maximum asymmetry value for 0.42 inches length damage on drill

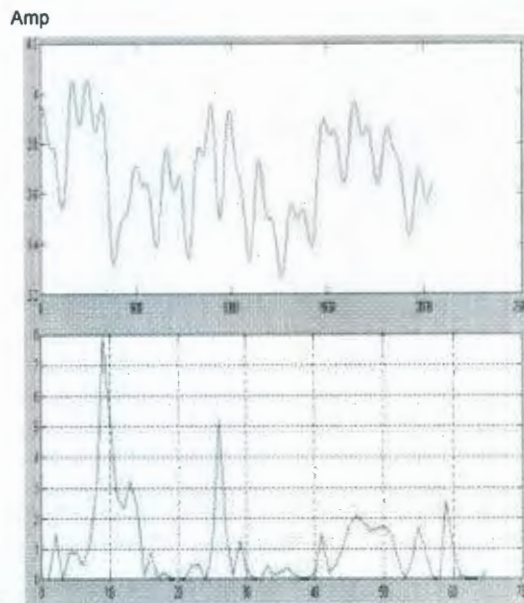
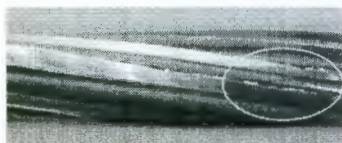
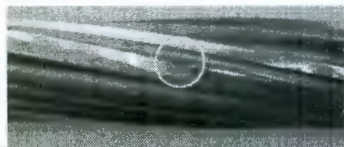


Fig. 13 Original signal and 1.9 maximum asymmetry value for 1.76 inches length damage on drill (maximum allowed on our application)

7. Conclusion

The spindle drive current result to be a close parameter related with the dynamics of drilling process and for the cutting tool condition monitoring.

Wavelet transformation was too helpful because simplify the signal analysis.

Asymmetry algorithm can distinguish between a worn and a usable drill on-line with 100% reliability and also accurately estimate for drill wear under different drilling conditions, so it is suggested that asymmetry might be a perfect tool for many applications requiring automated monitoring of manufacturing operations.

With this system, one work piece may be rejected because of the drill failure, but further damage is avoided too.

8. Author name(s) and affiliation(s)

Gilberto Herrera Ruiz. He was born at México, D.F. and studied his bachelor degree at ITESM, Monterrey. He obtained his Doctoral Degree at the Budapest Technical University. Nowadays he works at Queretaro State University as lecturer and researcher.

Wbaldo Leal Tafolla



He was born at Morelia, Michoacán and studied engineering at UMSNH, Morelia. He works in Cardanes, S.A. as Engineering Chief. Now he's finishing the control and instrumentation postdegree at UAQ. He's interested on modeling, análisis and implementing control systems for industrial process.

René Romero Troncoso. Was born at Leon, México. He obtained his B. E. on Electronics and Communications and his M. E. on Electric Engineering at FIMEE-U. de Guanajuato. He finished his Ph. D. at UAQ, Queretaro. His areas of interest are digital systems and VLSI.

9. References

[1] *SIEM 2000 Report* (Integral System for Maintenance Evaluation) at Cardanes, S.A.

[2] Erkki Jantunen, *A Summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 42 (2002) 997-1010

[3] Li X., Dong S., Yuan Z. "*Discrete Wavelet*

Transform for Tool Breakage Monitoring". International Journal of Machine Tool & Manufacture Pergamon, 1999. 39: 1935-1944.

[4] Rioul O., and Duhamel P. "*Fast Algorithms for Discrete and Continuous Wavelet Transforms*", 1992. IEEE Transactions on Information Theory. Vol. 38 No. 2: 569-585

[5] SIMON HAYKIN. *Neural Networks*. Prentice Hall, 1996.

[6] MARTIN T. HAGAN. *Neural Network Design*. PWS Publishing Company, 1996.

[7] Eiji Usui "Advancement of Intelligent Production", 7TH International Conference on Production / Precision Engineering, Chiba, Japan, September, 1994.

[8] RENE ROMERO T., GILBERTO HERRERA R. *Procesamiento de señales para la detección de ruptura de herramientas en sistemas de Manufactura por Control Numérico Computarizado*. Universidad Autónoma de Querétaro, 2004.



SENSORLESS TOOL FAILURE MONITORING SYSTEM FOR DRILLING MACHINES

INTERNATIONAL JOURNAL OF
**MACHINE TOOLS
& MANUFACTURE**
DESIGN, RESEARCH AND APPLICATION

Franco-Gasca Luis Alfonso^{a,*}, Herrera-Ruiz Gilberto^a, Romero-Troncoso René de Jesús^b,
Peniche-Vera Rocio^a, Leal-Tafolla Wbaldo^c

^a Facultad de Ingeniería-Universidad Autónoma de Querétaro Cerro de las Campanas s/n, 76010, Querétaro,
Qro., México

^b Electronics Department, FIMEE – Universidad de Guanajuato Tampico 912, Col. Bellavista, 36720
Salamanca, Gto., México

^c Cardanes S.A., Desc Automotriz, Acceso III No. 3, Parque Industrial Benito Juárez, 76120, Querétaro, Qro.,
México

Abstract.

It is well known that on-line tool condition monitoring has great significance in modern manufacturing processes. For preventing possible damages to the workpiece or the body machine, reliable techniques are required for providing an on-line response to an unexpected tool failure. Drilling is one of the most fundamental machining operations and two of the most crucial issues are tool wear and breakage. During the spindle process, the motor driver current is related to the drill condition: power consumption is higher for a worn drill in comparison to a sharp drill for the same process. This difference in power consumption can be self correlated to obtain the resulting waveform variance to provide a merit figure for tool condition. This paper describes a driver current signal analysis to estimate the tool condition by using the discrete wavelet transform in order to extract the information from the original cutting force, then an autocorrelation algorithm bring the tool damage in the form of an asymmetry weighting function. The current is monitored from the motor driver to give a sensorless approach. Experimental results are presented to show the algorithm performance.

Keywords: Tool failure, Wavelet Transform, Tool Monitoring.

* Corresponding author. Tel.: +52-442-1921264, ext.147; fax: +52-442-1921264, ext. 218
E-mail: lafranco@uaq.mx

1. INTRODUCTION.

The cutting tools represent the highest cost in the production process of the manufacturing industry besides to raw material. Drilling is one of the most common operation in machining, thus the number of drilling machines in use perform a considerable amount of works every year [1], as in others cutting processes tool breakage and wear in several forms are present; therefore, they could damage the process and then increase the production costs. To reduce expenses on the workpiece and machinery, on-line tool condition monitoring is mandatory [2]. Around the 80% of the experienced cases the investment in monitoring systems has been returned in one month or less [3].

In [4], Jantunen describes the studied and applied techniques of indirect monitoring in drilling. Vibration and sound based works have been reported, such methods are very sensitive to surrounding noise, which is inherent to the cutting processes, as the acoustic and ultrasonic vibrations. We can see that the most reported methods are related with torque, force and feed rate, because it is known that cutting forces increase when the damage is increased [4], [5].

Spindle motor current and feed driver current are closely related to the involved forces in machining, this is similar to torque measurement [4] since both show the amount of consumed power in the cutting process. Driver current monitoring is the best approach to acquire signals without sensors because in this way the machine is not modified, even when current sensors are used [6]. In addition, the current from servomotors is available in almost all the modern rotating machinery as turning, milling and drilling, directly from the servo driver. Practically all the current analysis based algorithms reported use a sensor to obtain the cutting signals.

2. THEORETICAL BACKGROUND.

According to Altintas [7], the main components of cutting forces (dF_t , dF_f , dF_r) can be evaluated in x , y , z directions. The total thrust and drill torque can be evaluated by the sum of contribution of all M lip elements. The total thrust force is found by adding the contributions of the chisel and lips that can be seen as a sinusoidal function plus a constant.

Direct measurements of signal shown severe interference from different sources represented in the additive model from Fig. 1. Romero-Troncoso approach [8] is a general procedure to estimate the main components of cutting force which extracts the filter characteristics. By following this approach to the drilling problem we use a low-pass filter (LPF) to ensure that the spectral contents of the cutting signal is preserved while spurious data is minimized. The designed filter does not eliminate all spurious components, but a subsequent Discrete Wavelet Transform (DWT) will enhance the cutting force signal by its filter bank property.

The wavelet transform brings a time-frequency representation of a signal in decimated form depending of the application detail level, the result will be the time-domain samples at the decimated frequency in a compressed form [12]. The base of wavelet transform, the wavelets, are generated from a basic wavelet function by dilatations and translations. Given a time-varying signal $f(t)$, a wavelet transformation consists of computing coefficients that are inner products of signal and a family of wavelets [9]. By DWT we should understand the continuous wavelets with the discrete scale and translation factors [10].

The DWT is defined as stated in equation 1, where $c_{j,k}$ is called the wavelet coefficient. This may be considered as a time-frequency map from original signal $f(t)$. An approach of multi-resolution analysis is used on the discrete scale function, defined together with equation 3.

$$c_{j,k} = \int f(t)\psi_{j,k}^*(t) dt \quad (1)$$

$$\phi_{j,k} = 2^{-\frac{j}{2}} \phi\left(\frac{t-2^j k}{2^j}\right) \quad (2)$$

$$d_{j,k} = \int f(t) \phi_{j,k}^*(t) dt \quad (3)$$

$d_{j,k}$ is called scale coefficient that is the sampled version of the original signal. The DWT computes the wavelet coefficients $c_{j,k}$ and $d_{j,k}$ ($j = 1, \dots, J$) given by equations 4 and 5.

$$c_{j,k} = \sum_n x[n] h_j[n - 2^j k] \quad (4)$$

and

$$d_{j,k} = \sum_n x[n] g_j[n - 2^j k] \quad (5)$$

where $x[n]$ is a discrete time series, $h_j[n - 2^j k]$ is called the discrete wavelets, equivalent to $2^{-j/2} \psi(2^{-j}(t - 2^j k))$. The term $g_j[n - 2^j k]$ is called scaling sequence. In the j th resolution, $c_{j,k}$ and $d_{j,k}$ represent the approximation and detail of the signal $f(t)$. In each resolution $j > 0$, the scale and wavelet coefficients are stated in 6.

$$\begin{aligned} c_{j+1,k} &= \sum_n g[n - 2k] d_{j,k} \\ d_{j,k} &= \sum_n h[n - 2k] d_{j,k} \end{aligned} \quad (6)$$

where the scaling coefficients $d_{j,k}$ represent the lower frequency approximations of the original signal, and the wavelet coefficients $c_{j,k}$ represent the distribution of differentially higher frequencies. The wavelet filters adopted determine the quality of the wavelet analysis. It was used the length 4 Daubechies system of wavelets, because it has the

advantages of orthogonality, compact support in the time domain and computational simplicity [11].

The number N of input data points is reflected in the size $N \times N$ of the wavelet transformation matrix T , which is a function of the filters h and g in equation (6). So the wavelet coefficients are like those given in equation 7.

$$\begin{pmatrix} d_{j+1,1} \\ c_{j+1,1} \\ d_{j+1,2} \\ \dots \\ \dots \\ d_{j+1,N/2} \\ c_{j+1,N/2} \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} d_{j,1} \\ d_{j,2} \\ d_{j,3} \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ d_{j,N} \end{pmatrix} \quad (7)$$

The proposed method to generate the tool damage rate estimation parameter is based on a non-linear autocorrelation function to calculate the asymmetry from the cutting force waveform of two continuous pulses. The asymmetry between two continuous pulses in the signal raises according to the damage on the drill, the autocorrelation operation is made through an asymmetry evaluation based on equation 8 where A is the asymmetry and B_i are the DWT coefficients. For a determined period of the compressed and filtered (by DWT) cutting signal the asymmetry is the point to point variance.

$$A = \sum_{i=1}^{10} (B_{i+10} - B_i)^2 \quad (8)$$

3. EXPERIMENT.

In order to detect the tool condition, two monitoring approaches had been followed, traditionally. The first approach extracts massive data from the process which gives a

precise overall behavior, but the quantity of data to be processed is too large for online detection; this technique is used for monitoring and offline processing. The second approach takes fewer data which can be processed online, but precision is compromised to detect tool wear or breakage and it is useful for detecting severe damages only.

To be able to detect online tool condition, the proposed algorithm should be capable to process sufficiently large quantity of data in a very short time. The principle is based on the fact that the cutting force is proportional to the spindle current signal, which is directly related to the tool condition [4]. Both spindle motor current and feed motor current change as tool damage does, with an almost linear incremental relationship [6]. Therefore, in this work the spindle current is used to get the damage rate of drill. To have a sensorless instrumentation approach the signal is monitored from the servo motor drive. Current signal is embedded with interference and noise that have to be eliminated in order to perform a suitable processing. When the signal is noise and interference limited, it is compressed and filtered again by the DWT then the resultant signal is ready to be analyzed by a simple signal processing algorithm for tool damage extraction.

For testing the algorithm a CNC Baker-422 drilling machine with different Kennametal drills was used, Fig. 2. The drilling set up is summarized in Table 1. The present time this machine is part of the production process of a heavy yoke Fig. 3 made of pearlitic nodular as-cast ductile iron, SAE J434C grade D 7003 at Cardanes S.A., an automotive Mexican company dedicated to manufacture and trade cardan shafts to Ford, General Motors, Mercedes Benz, Volvo, of all others, which demand high quality products.

The system is sensorless since the current signal was taken from the servomotor spindle driver, a data acquisition system (DAS) with a programmable peripheral interface and sampling frequency $f_s=256\text{Hz}$ is used to obtain the data points from the signal. Acquired data are stored in a personal computer where a low-pass 8th order Chebyshev filter with cutoff frequency at $f_c=30\text{Hz}$ removes all undesired noisy components. Two continuous pulses are selected to be processed by Wavelet Transform, a set of 512 points from the

filtered signal is compressed applying a level-4 Daubechies-4 DWT. The DWT compression ratio gives as a result a 32-points signal which can be easily processed in a very short time with just a few resources. The algorithm to determine the tool condition from the compressed data is the autocorrelation asymmetry because its value increases according to the state of tool. The maximum asymmetry allowed to the reliable drill performance has been experimentally determined.

4. SIGNAL ANALYSIS.

The number of the workpieces that can be produced with the drilling is based on the state of the tool, it means that tool life is variable and it is possible to have a different number of pieces. A whole 14-piece cycle was monitored in order to test the algorithm performance.

Fig. 4 shows the whole analysis of a 8-second segment of the original signal when the drilling machine had a good condition tool. In 4(a) the original current signal is presented as it was acquired from the spindle motor driver, composed of a DC level plus an AC component this signal is full of noise that results difficult to make a reliable analysis of the tool condition. In 4(b) is shown a periodic pattern that represents the original signal without the high frequency components because a LPF has been applied to remove them, the new noise free signal can be processed in order to know the worn of the drill. According to the experiments performed, the DC level in the signal is influenced by the feed rate of the drill and the workpiece hardness. To compute the asymmetry algorithm it is essential to analyze two consecutive pulses on the signal. In 4(c) there are two pulses determined by the processing algorithm where there is a variation between the waveform of each pulse. To calculate that variation the number of points is reduced (compressing the signal via DWT) in order to make a faster processing. In Fig. 4(d) is manifest how the application of the 4-level wavelet transform conserve the waveform pattern of the original clean signal but defined with a few data. At this point we are able to evaluate easy and quick the irregularity between the pulses applying the autocorrelation function, in 4(d) is represented the

comparison of some samples which determined the asymmetry value of the segment, that for this particular section is 1.9.

With a damaged tool Fig. 5 shows the same analysis as Fig. 4, the original noisy signal is shown in 5(a). A new signal is originated in 5(b) using a low-pass filter in the 8-second data segment in this case the irregular waveform represents the damage in the drill. In 5(c) is the two pulses signal that has an asymmetric pattern that may give us enough information about the damage of the drill. As 5(d) shows there is a big difference in the waveform of the pulses not as the good tool example, then an asymmetry value of 5.0 is reached.

The comparison of two consecutive pulses continues until the end of the cutting signal, this way a damage pattern is generated according to signal deformation represented by the asymmetry. The number of points in the asymmetry signal will depend on the drilling cycle time, although a new value can be computed every two pulses so when the tool reach a fixed damage level the process can be stopped on time, before the wrong condition could damage the tool and the machine. The Figures 6(a) and 6(b) exhibit the asymmetry values for the 8 seconds of data from the Fig. 4(a) and Fig. 5(a), respectively. An advantage of this method is that definition of damage is only based on the deformation of consecutive pulses, making it a very fast analysis tool for monitoring systems.

5. RESULTS.

The asymmetry value will increase according to the status of the tool, because of the drill dimensions is usual to have damage over the lips before the tool replacement. The quality standards of the workpiece allow just a small value of asymmetry determined by experimentation on the machine, several drills were used in order to know the maximum asymmetry, the Fig. 7 shows three different rates of drill damage and their corresponding asymmetry for a data segment. In 7(a) the tool is normal and consequently the asymmetry

has a small value that is always lower than 1, this behavior can be watched during the first seven cycles. Since the 8th cycle in 7(b) the tested tool had a 0.42 inches (1.06 cm) length damage in one of the lips, for this damage level the asymmetry increases up to 5, even though the workpiece is still produced with good quality this asymmetry is reaching a critical range of values revealed in the next 3 cycles too. The worst case scenario for the drilling machine is shown in 7(c) because of the severe 1.76 inches (4.47 cm) length damage in tool that carries an average asymmetry value over 10 units, associated to defective pieces this condition is presented at the end of the cycle 11 and it continues becoming worse the succeeding processes. Under this circumstance the produced yoke was considered as deficient by the quality department.

Graphic of asymmetry values including all drilling cycles is shown in Fig. 8. This graphic reproduce the behavior of the drill and its close relationship with the irregularity of the waveform. Since the first work cycle is clear how the difference is raising till the end of the process. For the first cycle the maximum values are barely around 2 units, although the asymmetry has a continuous but slow growing until the cycle 8 where start a faster change due to the damage rate. By the 13th drilling cycle surface finish quality and size diameter of the workpiece were out of the required limits so a higher asymmetry value is unacceptable and a tool change is recommended.

6. CONCLUDING REMARKS.

The spindle drive current can be related with the dynamics of drilling process and for the cutting tool condition monitoring. The wavelet transform is helpful because it simplifies the signal analysis compressing and filtering the original cutting force signal. The asymmetry algorithm can distinguish between a worn and a usable drill with high reliability and also accurately estimate drill damage under different drilling conditions.

The whole algorithm has been tested with a personal computer as processor unit but it can be implemented with a SOC (System on a Chip) approach in order to get an online monitoring system controlling the machine, as the system will be sensorless and use the servo driver current it can be applied on different machines just compensating the tolerance parameters according to the kind of damage monitored, besides the personal computer will be no longer necessary thus the new model will be cost effective.

On market there are commercial equipments that are used to detect tool worn problems. They use one or more sensors, so they are expensive solutions. Our proposal is a sensorless system because it can work with no computer systems and for on-line applications.

REFERENCES.

- [1] Huseyin M. Ertunc, Kenneth A. Loparo, Hasan O., Tool wear condition monitoring in drilling operations using hidden Markov models (HMMs), *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 41 (2001) 1363–1384.
- [2] Tool Damage Detection, User Manual, Brankamp Co., 1998.
- [3] Pechloff, S., Can you afford to ignore tool monitoring, *Production Machining*, Gardner Publications, Inc., March/April 2003.
- [4] Jantunen, E., A Summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 42 (2002) 997-1010.
- [5] Ertunc, H.M., Loparo, K.A., A decision fusion algorithm for tool wear condition monitoring in drilling, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 41 (2001) 1347–1362.

- [6] Li, X., Tso, S.K., Drill wear monitoring based on current signals, *Wear* 231 (1999) 172-178.

- [7] Altintas, Y., *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*, Cambridge University Press, Cambridge, 2000.

- [8] Romero-Troncoso, R. de J., Herrera-Ruiz, G., Driver current analysis for sensorless tool breakage monitoring of CNC milling machines, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43 (2003) 1529-1534.

- [9] Li, X., Tso, S. K., Real-Time Tool Condition Monitoring Using Wavelet Transforms and Fuzzy Techniques, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Applications and Reviews* 30 (3) (2000) 352-357.

- [10] Poularikas, A. D., *Wavelet Transform, The Transforms and Applications Handbook*, CRC Press LLC, Florida, 2000.

- [11] Kasashima, N., Herrera-Ruiz, G., Kasuo, M., On-line failure detection in face milling using discrete wavelet transform, *Annals of the CIRP* 44 (1995) 483-487.

- [12] Romero-Troncoso, R. de J., Herrera-Ruiz, G., FPGA based on-line tool breakage detection system for CNC milling machines, *Mechatronics* 14 (2003) 439-454.

FIGURES AND TABLES.

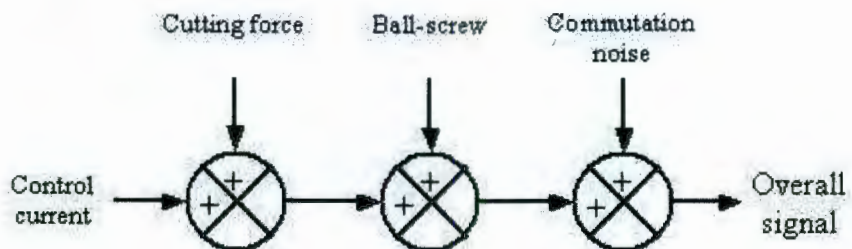


Fig. 1. Additive model for driver current contributors.

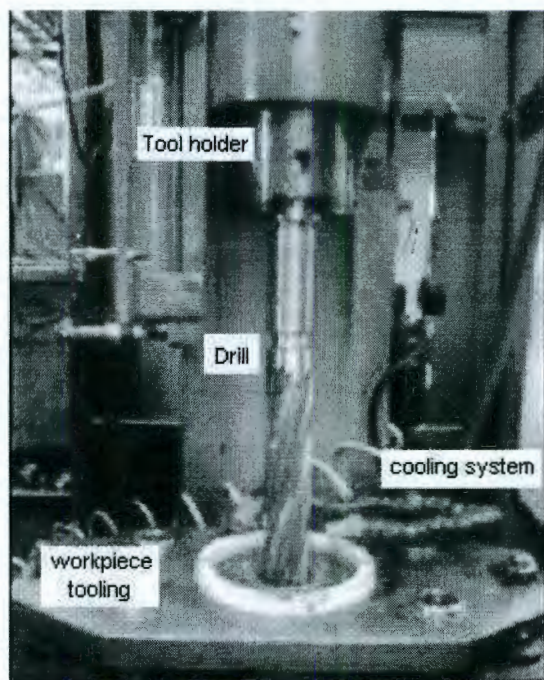


Fig. 2. CNC Baker-422 drilling machine.



Fig. 3. Workpiece.

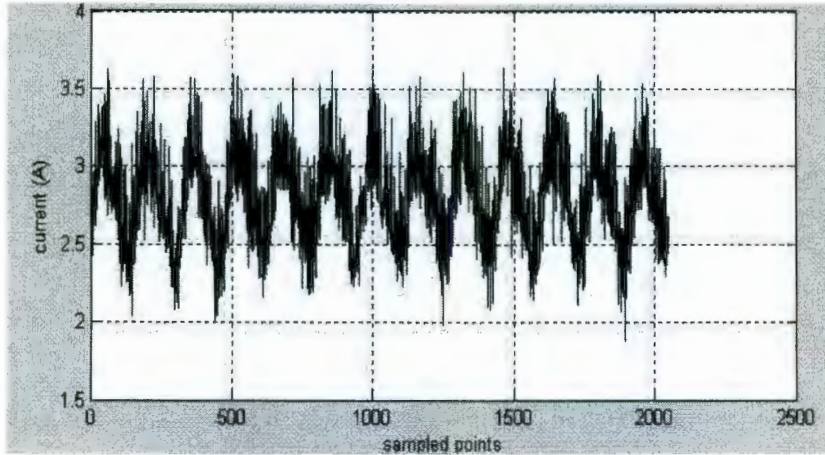


Fig. 4(a). Original cutting signal of normal tool.

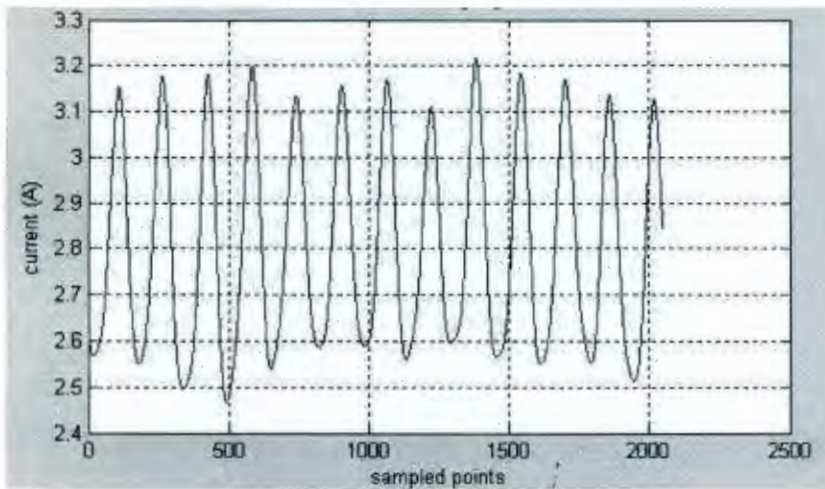


Fig. 4(b). Filtered cutting signal of normal tool.

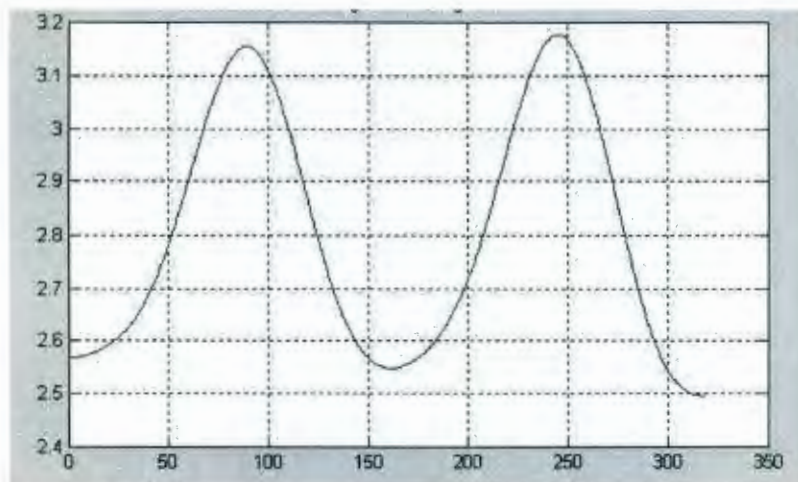


Fig. 4(c). Original data signal of normal tool.

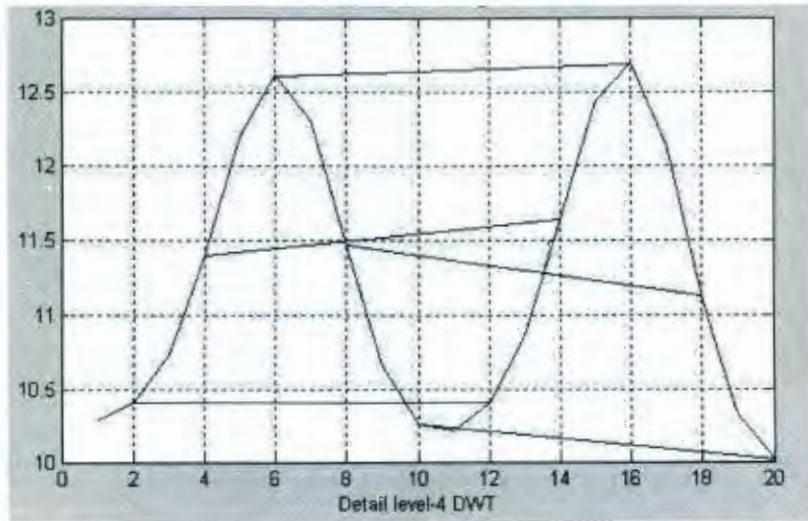


Fig. 4(d). Compressed data segment of normal tool.

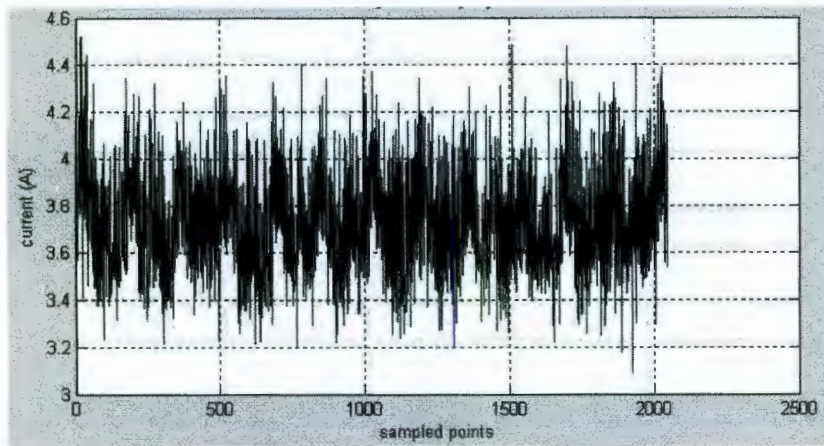


Fig. 5(a). Original cutting signal of damage tool.

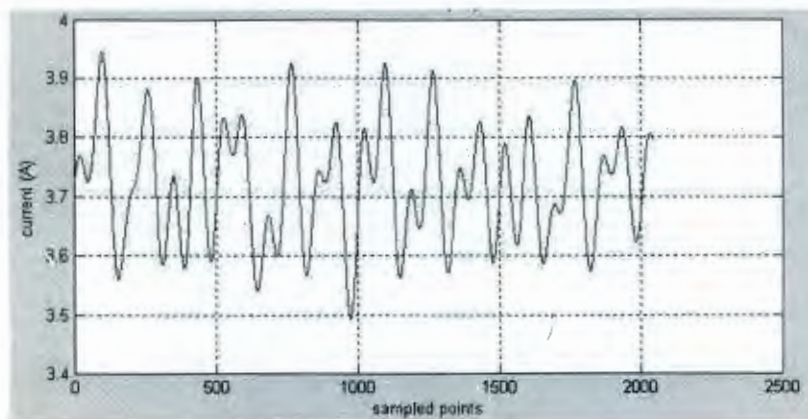


Fig. 5(b). Filtered cutting signal of damage tool.

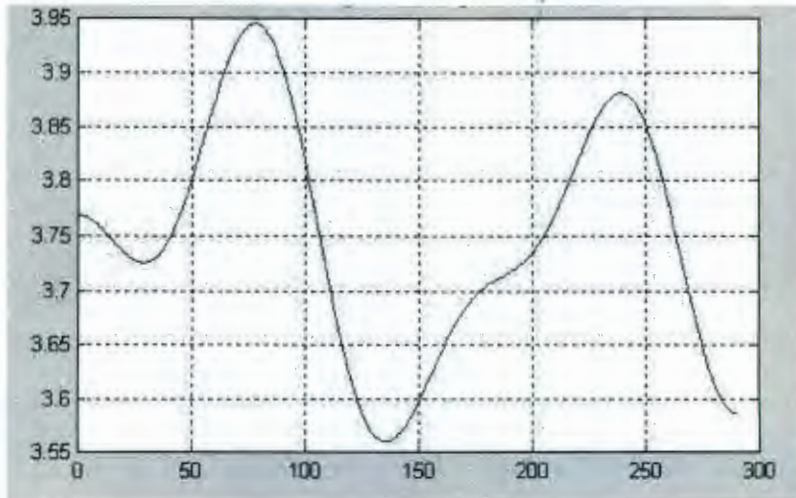


Fig. 5(c). Original data signal of damage tool.

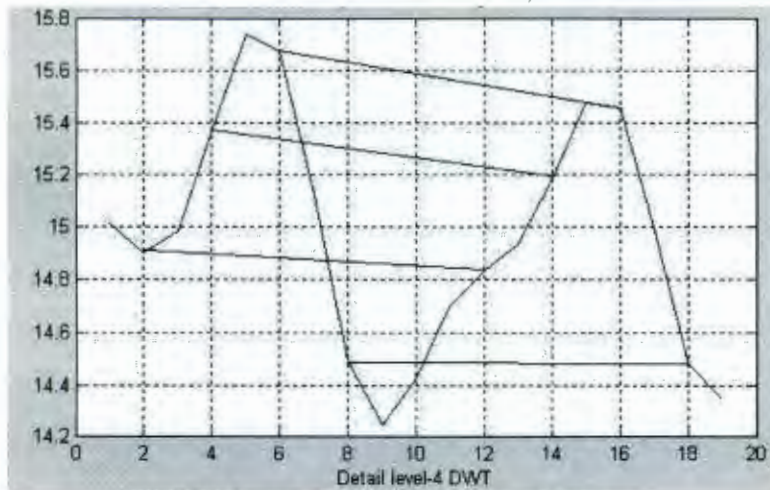


Fig. 5(d). Compressed data segment of damage tool.

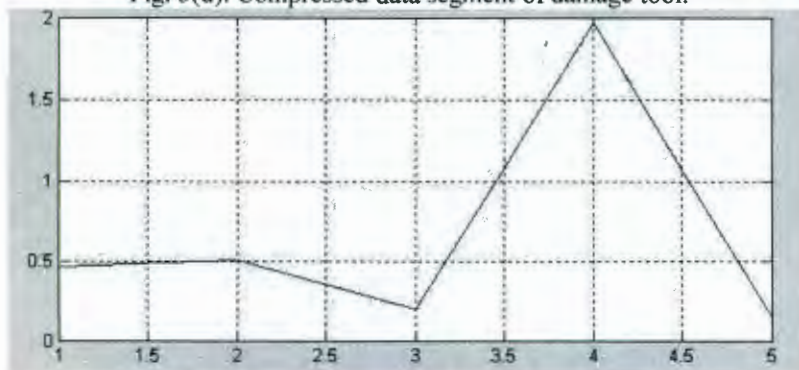


Fig. 6(a). Asymmetry plot value of normal tool.

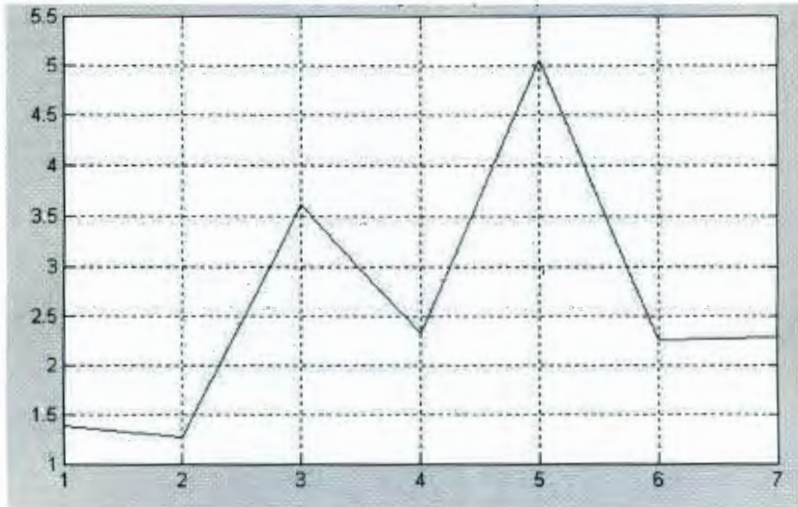


Fig. 6(b). Asymmetry plot value of damage tool.

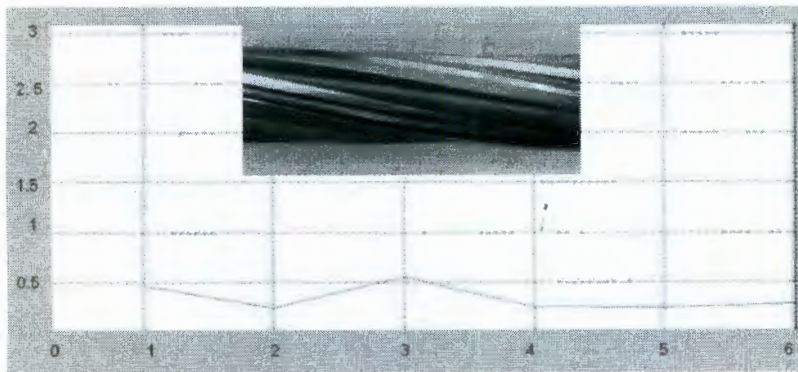


Fig. 7(a). Normal tool asymmetry plot.

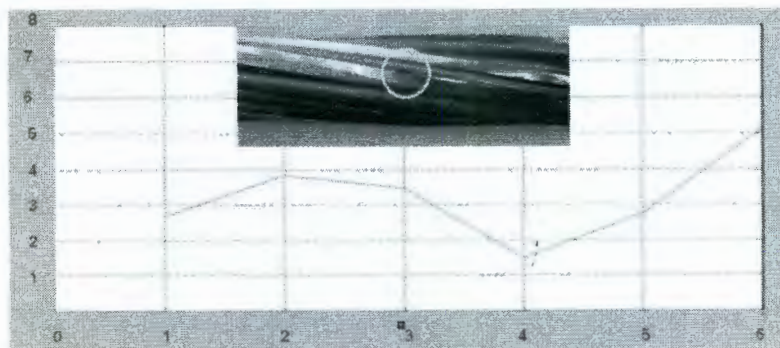


Fig. 7(b). Damage tool asymmetry plot.

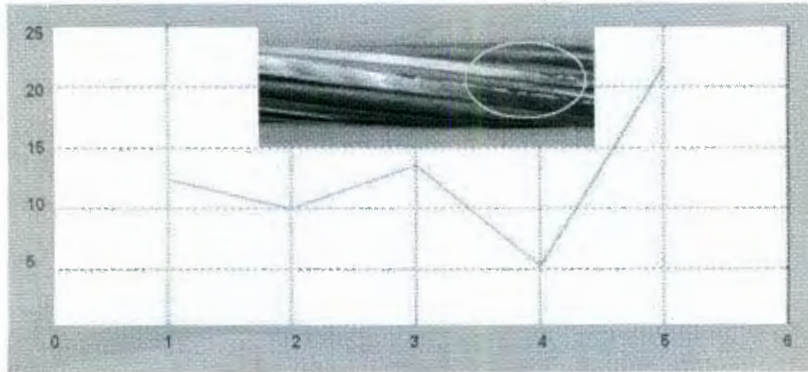


Fig. 7(c). Broken tool asymmetry plot.

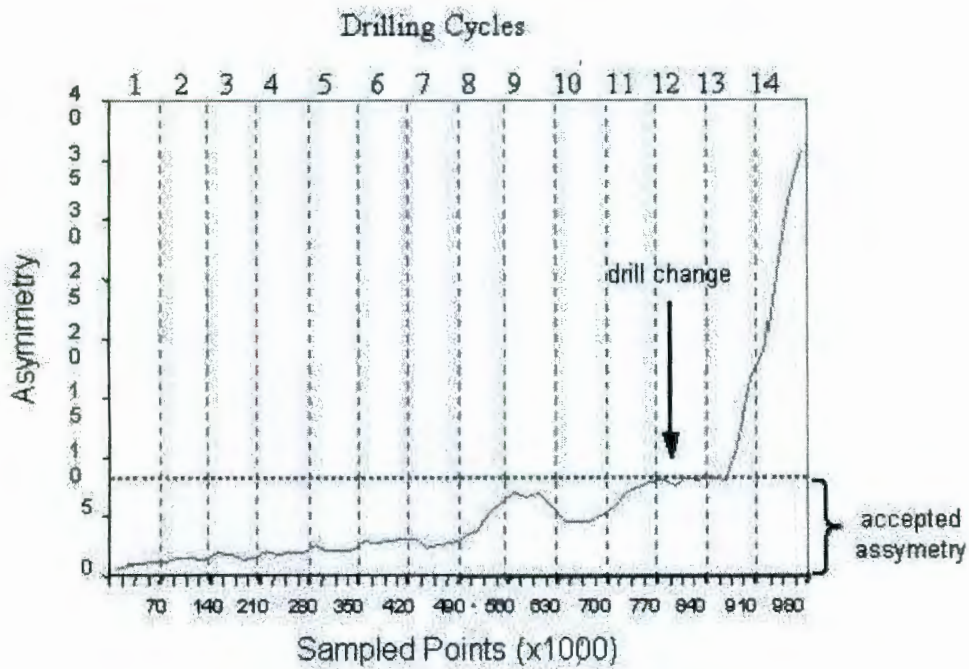


Fig. 8. Asymmetry plot for a drilling process.

Right cutting drill	Lenght	Diameter
	635 mm	53 mm
Spindle speed	100 RPM	
Feedrate	80.0 mm/min	
Depth of cut	254.0 mm	
Coolant	Hocut 931	

Table 1. Experimental set-up