



Universidad Autónoma de
Querétaro
Facultad de Ingeniería

Análisis de la relación del desgaste de la herramienta y
las vibraciones en el proceso de torneado

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el título de:

Ingeniero Electromecánico

Presenta:

Geovani Daniel Aguilar Villaseñor

Dirigido por:

M.C. Miguel Trejo Hernández

San Juan del Río Querétaro, Marzo de 2010

No. Adq. H73663

No. Título _____

Clas TS

671.35

A 2800

C. U. 17 de marzo de 2009

C. GEOVANI DANIEL AGUILAR VILLASEÑOR
Pasante de Ingeniería Electromecánica
Presente.

Con relación a su oficio enviado al H. Consejo Académico de la Facultad en el que solicita titularse bajo la opción de tesis individual, me permito informarle que en la sesión ordinaria del 17 de marzo del año en curso, este cuerpo colegiado acordó aceptar la opción de titulación por lo que deberá trabajar en el tema "**Análisis de la relación del desgaste de la herramienta y las vibraciones en el proceso de torneado**" bajo la dirección del M EN C. MIGUEL TREJO HERNÁNDEZ.

El Contenido aceptado por el H. Consejo Académico es el siguiente:

Índice

1. INTRODUCCIÓN

- 1.1 Antecedentes
- 1.2 Objetivo general
- 1.3 Objetivos particulares
- 1.4 Justificación

2. ESTADO DEL ARTE

- 2.1 Máquinas de CNC
- 2.2 Principios del proceso de torneado
- 2.3 Mecánica del proceso de torneado
- 2.4 Tipos de desgaste en la herramienta
 - 2.4.1 Desgaste de flanco y de cráter
 - 2.4.2 Despostillamiento o fractura
 - 2.4.3 Viruta acumulada en el borde (*built-up-edge*)
 - 2.4.4 Observaciones generales sobre el desgaste de la herramienta
- 2.5 Causas de vibración en el proceso de torneado
 - 2.5.1 Movimientos vibratorios provenientes del exterior
 - 2.5.2 Funcionamiento irregular de la máquina
 - 2.5.3 Fijación irregular de la pieza
 - 2.5.4 Fijación irregular de la herramienta
 - 2.5.5 Altura del filo de la herramienta

- 2.6 Tipos de sensores para medición de aceleración
 - 2.6.1 Sensor de desplazamiento relativo con contacto (LVDT)
 - 2.6.2 Sensor de elemento capacitivo
 - 2.6.3 Sensor de aceleración o acelerómetro (basado en tecnología MEM'S)

- 2.7. Técnicas de procesamiento de señales
 - 2.7.1 Filtrado digital y aproximación Butterworth
 - 2.7.2 FFT (Transformada rápida de Fourier)
 - 2.7.3 Cálculo del valor RMS

3. METODOLOGÍA

- 3.1 Descripción del experimento
- 3.2 Instrumentación y sujeción del acelerómetro
- 3.3 Clasificación de insertos y medición del desgaste.
- 3.4 Cálculo de los parámetros de corte
- 3.5 Adquisición de las señales de vibración
- 3.6 Filtrado digital y ventaneo en tiempo
- 3.7 Valor RMS

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5. CONCLUSIONES

6. REFERENCIAS

Anexos

También hago de su conocimiento las disposiciones de nuestra Facultad, en el sentido que antes del Examen profesional deberá cumplir con los requisitos de nuestra legislación y deberá imprimir el presente oficio en todos los ejemplares de su tesis.

Atentamente

"EL INGENIO PARA CREAR NO PARA DESTRUIR"

DR. GILBERTO HERRERA RUIZ

Director

c.e.p. Archivo

*GHR/DHM.

DEDICATORIAS

*A mis padres antes que nada
por todo el apoyo que me brindaron
y a mi esposa e hijo*

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todos los profesores de esta institución que ayudaron a mi formación.

También un agradecimiento a mi director de tesis M.C. Miguel Trejo Hernández, a mis sinodales, Dr. Aurelio Domínguez González, Dr. Luis Alberto Morales Hernández y al M.C. Manuel García Quijada.

Quiero agradecer a mis compañeros que me brindaron su apoyo durante mi estancia en esta institución, y también un agradecimiento muy especial a esta universidad, por darme la oportunidad de estudiar aquí.

ÍNDICE

Dedicatorias

Agradecimientos

1. INTRODUCCIÓN	7
1.1 Antecedentes	8
1.2 Objetivo general	9
1.3 Objetivos particulares	10
1.4 Justificación	10
2. ESTADO DEL ARTE	12
2.1 Máquinas de CNC	12
2.2 Principios del proceso de torneado	12
2.3 Mecánica del proceso de torneado	15
2.4 Tipos de desgaste en la herramienta	16
2.4.1 Desgaste de flanco y de cráter	16
2.4.2 Despostillamiento o fractura	19
2.4.3 Viruta acumulada en el borde (<i>built-up-edge</i>)	20
2.4.4 Observaciones generales sobre el desgaste de herramienta	20
2.5 Causas de vibración en el proceso de torneado	21
2.5.1 Movimientos vibratorios provenientes del exterior	24
2.5.2 Funcionamiento irregular de la máquina	24
2.5.3 Fijación irregular de la pieza	25
2.5.4 Fijación irregular de la herramienta	25
2.5.5 Altura del filo de la herramienta	25
2.6 Tipos de sensores para medición de aceleración	27
2.6.1 Sensor de desplazamiento relativo con contacto (LVDT)	27
2.6.2 Sensor de elemento capacitivo	28
2.6.3 Sensor de aceleración o acelerómetro (basado en tecnología MEM'S)	29
2.7 Técnicas de procesamiento de señales	31

2.7.1	Filtrado digital	32
2.7.2	FFT (Transformada Rápida de Fourier)	33
2.7.3	Cálculo del valor RMS	38
3.	METODOLOGÍA	39
3.1	Descripción del experimento	39
3.2	Instrumentación y sujeción del acelerómetro	40
3.3	Clasificación de insertos y medición del desgaste de la herramienta	42
3.4	Cálculo de parámetros de corte	47
3.5	Adquisición de señales de vibración	49
3.6	Filtrado digital y ventaneo en tiempo	52
3.7	Valor RMS	53
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	54
5.	CONCLUSIONES	61
6.	Referencias	62
Anexo A.	Hoja de datos del acelerómetro	65
Anexo B.	Programas en Matlab	72

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Maquinados en torno	8
Tabla 2.2 Rango de frecuencias de transductores de vibración típicos.	28
Tabla 3.1 Relación entre ejes del acelerómetro y del torno.	39
Tabla 3.2. Condiciones de corte de la experimentación	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Fuerzas que actúan en un proceso de torneado.	11
Figura 2.2 Tipos de desgaste en la herramienta.	13
Figura 2.3 Desgaste que sufre la herramienta.	14
Figura 2.4 Viruta acumulada en el borde (<i>built-up-edge</i>).	16
Figura 2.5 Modelo del acelerómetro.	25
Figura 2.6 Sensores capacitivos.	26
Figura 2.7 Estructura del acelerómetro.	27
Figura 2.8 Deformación de una viga.	27
Figura 2.9 Diseño de acelerómetros.	28
Figura 3.1 Diagrama a bloques de la experimentación.	35
Figura 3.2 Configuración experimental. a) Torno CNC utilizado. b) Instrumentación del acelerómetro.	35
Figura 3.3 Acelerómetro a) Encapsulado b) Diagrama de conexión y c) Diagrama PCB.	37
Figura 3.4. Configuración experimental. a) Medición de aceleración en el sentido de las fuerzas F_a y F_r . b) Aceleración en el sentido de las fuerzas F_a y F_t .	38
Figura 3.5 Microscopio Nikon Epiphot 200	39
Figura 3.6 Clasificación de insertos	40
Figura 3.7 Programa de procesamiento de imágenes.	41
Figura 3.8 Ventana para cálculo del área de desgaste.	41
Figura 3.9 Procesamiento de imágenes. a) Umbralización y b) rellenado de área.	42
Figura 3.10 Resultado del área de desgaste calculada por el programa.	43
Figura 3.11. Gráfica del área de desgaste para los 10 insertos seleccionados.	44
Figura 3.12 Diagrama de desgaste para herramientas de carburo de tungsteno.	45
Figura 3.13 Pantalla del software con el que cuenta el torno CNC.	47

Figura 3.14. Señal de vibración obtenida para tres ciclos de cilindrado eje X.	47
Figura 3.15 Señal de vibración obtenida para tres ciclos de cilindrado.eje Z	48
Figura 3.16 Filtrado digital y ventaneo en tiempo de la señal de vibración.	49
Figura 4.1 Insertos con diferente porcentaje de desgaste.	50
Figura 4.2 Gráficas de aceleraciones y resultante.	52
Figura 4.3. Aceleración en el eje X (en el sentido de la Fuerza Axial).	53
Figura 4.4. Aceleración en el eje Y (en el sentido de la Fuerza Radial).	54
Figura 4.5 Aceleración en el eje Z(en el sentido de la Fuerza Tangencial).	55
Figura 4.6.Aceleración resultante de las componentes Xrms, Yrms y Zrms.	55
Figura 4.8.FFT para señales de vibración debido al maquinado con insertos de distinto grado de desgaste.	57

1. INTRODUCCIÓN

La medición de aceleración es importante en varias situaciones que involucran sistemas mecánicos. Tres áreas de aplicación importantes son la medición de vibraciones en maquinaria, la detección de choques de vehículos, y la sismografía. La medición de vibraciones es útil tanto para evaluar los esfuerzos que se producen en diferentes máquinas, y su efecto probable sobre el desgaste de diversas partes o sobre el ser humano, como para rastrear el origen de diversos tipos de ruidos. En la detección de choques, se emplea para disparar el inflado de las bolsas de aire que se utilizan en diversos automóviles para amortiguar el golpe de una eventual colisión. Finalmente, los sismógrafos permiten evaluar la intensidad de un sismo, o inclusive activar una alarma cuando comienzan a detectarse vibraciones de baja frecuencia, características de los sismos. La mayor dificultad encontrada clásicamente en el diseño de estos instrumentos, ha sido siempre el elevado costo de los sensores. Esta dificultad ha sido superada, al menos para el sector de aplicaciones de mediana precisión, mediante la introducción de los acelerómetros monolíticos. Esto les abrió las puertas a los acelerómetros de tecnología MEM'S (Micro Electro Mecanismos) que hoy en día se utilizan con un costo mínimo.

La presente tesis está dividida en cuatro capítulos como se describe a continuación: En el capítulo I se observan los antecedentes, los objetivos y la justificación de este trabajo. En el capítulo II, se presenta el estado del arte sobre el tema aquí tratado, de tal manera que son abordados los principios del maquinado en control numérico, las principales causas del desgaste en las herramientas de corte y sus principales tipos. Así mismo, se abordan algunas de las herramientas que hacen posible el procesamiento digital de señales. En el capítulo III se puede observar la metodología seguida para la adquisición y el procesamiento de las señales de vibración. Finalmente el capítulo IV muestra el análisis y discusión de los resultados obtenidos a partir de la experimentación, adquisición y procesamiento de las señales y datos presentes en el proceso de maquinado.

1.1 Antecedentes

Dentro de los trabajos realizados, respecto a vibraciones en la herramienta de corte en torno de control numérico, se encuentran algunos artículos relacionados, que se mencionan a continuación:

En el trabajo de (Tarnq, 2001) se habla de la adaptación de un sistema de absorción de vibración en la herramienta, para la disminución de vibraciones durante el proceso de torneado, el propósito fue suprimir las vibraciones en la herramienta y en el análisis, utilizan un acelerómetro para hacer la comprobación del sistema implementado.

Süleyman, (2006) Estudia las fuerzas de corte generadas en procesos de corte de metal que tienen una influencia directa en la generación de calor, la cual provoca el desgaste y la falla de la herramienta, esto también influye en el acabado superficial y la exactitud en la pieza de trabajo. Mediante un dinamómetro y un acelerómetro (piezo-eléctrico) mide las fuerzas estáticas y dinámicas de corte.

Por su parte, (Dimla 2000) describe un método analítico y experimental para una técnica que involucra el uso de tres componentes mutuas perpendiculares de fuerzas de corte (estáticas y dinámicas) y medición de vibración.

(S. Arribas Infante, A. Brime Domínguez, 2001). Hacen un recorrido a lo largo de la historia de las herramientas de corte desde las primeras demostraciones hechas por Fredrick Taylor en 1900 hasta la actualidad. Al mismo tiempo que se enumeran por orden cronológico la aparición de los distintos tipos y materiales para herramientas de corte, se recogen algunas de sus principales características, métodos de fabricación y aplicaciones. Se indica el uso de los principales materiales empleados en la actualidad y su evolución en cuestiones de maquinados con CNC.

En el trabajo de (Cuevas, 2000) se analiza el comportamiento de los insertos, durante un proceso de torneado CNC, en el cual, se mide el comportamiento acústico a causa de la falla de los insertos bajo esfuerzo de deformación plástica, con el fin de desarrollar un sistema de supervisión de ruptura de la herramienta.

(Romero 2004) Desarrolló un sistema de monitoreo de las condiciones de las herramientas en máquinas de CNC. Se parte de las señales obtenidas de los servo-amplificadores, filtrado analógico y análisis con ondoletas, para identificar el porcentaje de desgaste que existe en la herramienta. El estudio se hizo en un proceso de fresado.

(Cornejo, 2000) Realiza un trabajo acerca de la detección de ruptura de las herramientas de corte en fresado, utilizando procesamiento de señales, el cual se desarrollo a partir de un análisis de las corrientes existentes en los servomotores de la máquina, la cual se desarrolla mediante la transformada de Fourier.

En (García, 2006) se trabaja en el desarrollo de un sistema de supervisión de ruptura de herramientas de corte para torno CNC. En el cual se utilizan las señales de corriente-voltaje de los servoamplificadores, y la detección del estado del inserto se hace en base al desgaste del flanco y al incremento de la energía consumida.

En base a optimizar el proceso de torneado reduciendo el tiempo de maquinado, en (Trejo, 2006), se actúa sobre los parámetros de velocidad de corte, profundidad de corte y avance, a través de la utilización de control difuso como algoritmo de control, sobre los parámetros mencionados.

1.2 Objetivo general

Un aspecto fundamental, no solo en el área de automatización de las máquinas-herramienta, es obtener una mejora en tiempos de maquinado, maquinados de calidad y reducción de los costos en la fabricación de las piezas.

También, una parte importante es el estudio del desgaste de la herramienta, por lo que en este trabajo se pretende estudiar el comportamiento entre las condiciones de desgaste del cortador y el nivel de vibración producido durante el proceso de corte para, en estudios posteriores, monitorear el estado de la herramienta a partir de dicha relación.

1.3 Objetivos particulares

Los objetivos particulares del presente trabajo, se resumen en los siguientes puntos:

1. Clasificación y obtención del grado de desgaste de varios insertos.
2. Obtener las señales de vibración en el proceso de torneado, esto a través de la instrumentación de un acelerómetro.
3. Procesar las señales de vibración, mediante filtrado digital y otras técnicas de procesamiento (FFT, valor RMS).
4. Analizar los resultados experimentales entre el desgaste de la herramienta y los niveles de vibración.

1.4 Justificación

En años recientes, un gran progreso se ha realizado en el maquinado de precisión. Hoy en día, es posible hacer partes de precisión con exactitud de micras, las cuales tienen aplicaciones biomédicas, electrónicas o en ingeniería espacial. Sin embargo, un gran número de problemas permanecen sin resolver. Un ejemplo de ello, es que la dureza de las herramientas de corte y la pieza de trabajo, plantean una mayor limitación en cuanto a la exactitud de las piezas maquinadas y la vida de la herramienta.

Algunas de las posibles aplicaciones, en éste caso, van dirigidas hacia las mejoras constantes en las máquinas de control numérico (CNC), en las que se busca mejorar la producción evitando piezas con malos acabados. Esto puede lograrse en parte, a través del monitoreo del desgaste o ruptura de las herramientas de corte. Este estudio puede tener aplicaciones en otros procesos de maquinado como el fresado, barrenado, entre otros, lo que abre aún más el panorama de aplicación.

2. ESTADO DEL ARTE

A continuación, se aborda el estado del arte sobre el presenta tema. De esta manera, se describen algunos principios del maquinado en control numérico, las principales causas del desgaste en las herramientas de corte y sus principales tipos. Así mismo, se abordan algunas de las herramientas que hacen posible el procesamiento digital de señales

2.1 Máquinas de CNC

El gran avance en la automatización comenzó con el control numérico (CN) de las máquinas herramientas a principios de 1950. A partir de este histórico desarrollo, se ha avanzado con rapidez en la mayor parte de los aspectos de la manufactura. Estos aspectos implican la introducción de las computadoras en la automatización, el control numérico computarizado (CNC), control adaptable (CA), autómatas industriales y sistemas de manufactura integrados por computadora (MCI), que incluyen el diseño (CAD, Diseño Asistido por Computadora), la ingeniería (CAE, Ingeniería Asistida por Computadora) y la manufactura (CAM, Manufactura Asistida por Computadora), (Kalpakjian, 2002).

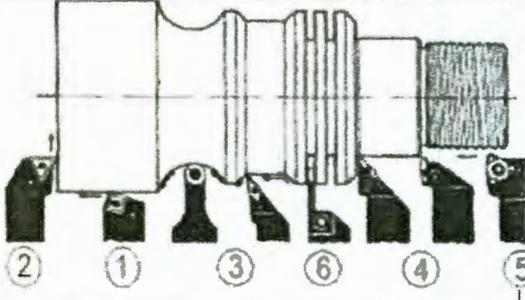
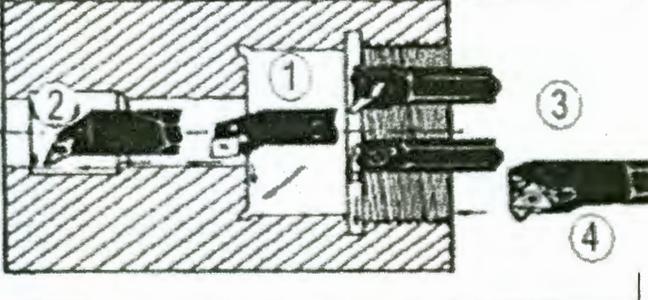
2.2 Principios del proceso de torneado

Aunque el torno es la máquina herramienta más antigua, todavía es la más comúnmente usada en las operaciones de maquinado en la industria de manufactura. Así, de forma general, durante muchos siglos se han usado los tornos de pedal y desde 1569 Besson inventó un torno para hacer tornillos. Sin embargo la historia de las máquinas herramienta modernas comenzó con la primera máquina herramienta básica. Y el primer torno para hacer tornillos de metal fue construido por Henry Maudslay en 1800.

En la actualidad el torno accionado a motor es realmente el padre de todas las máquinas herramientas. El torno puede usarse para tornear, para hacer roscas, para mandrilar, taladrar, carear, refrentar, conformar a rotación y rectificar

a esmeril. De esta manera, se presenta en la Tabla 2.1 los procesos de corte en torno, más comunes.

Tabla 2.1 Maquinados en torno.

Torneado exterior	Torneado interior
	
1. Cilindrado	1. Cilindrado
2. Refrentado	2. Refrentado o copiado
3. Copiado, hacia adentro o afuera	3. Perfilados
4. Cortes perfilados	4. Roscado
5. Roscados	
6. Trozado	

Los tornos son usados por operarios para producir partes de fabricación especial o unas cuantas piezas para una corrida breve de producción. También se usan para la fabricación de herramientas, la reparación de máquinas y para mantenimiento.

Las máquinas totalmente automáticas, como los tornos y las máquinas para fabricar tornillos se programan para hacer una secuencia de operaciones de maquinado para hacer un producto terminado. Los tornos de torreta automáticos se programan por medio de un tablero de control numérico (Scoriazza, 1998).

Por otra parte, en el proceso de torneado se deben elegir las condiciones de corte. Estos parámetros son la profundidad de corte d (*mm o pulg*), la velocidad de corte V_c (*m/min o pulg/min*), el avance f (*mm/rev o pulg/rev*) o velocidad de

avance V_f (mm/min) y la velocidad de rotación de la pieza N (rpm). Los parámetros V_c , f y d , por lo general, son tomados de tablas recomendadas para el tipo de material y herramienta de corte a utilizar. N y V_f pueden ser calculadas mediante las Ecuaciones 2.1 y 2.2 respectivamente.

$$N = \frac{V_c}{\pi D} \quad \text{Ec. (2.1)}$$

$$V_f = fN \quad \text{Ec. (2.2)}$$

Además, algunas velocidades particulares de corte, avances bajos y elevados, pueden influir sobre las vibraciones en el proceso de maquinado. A continuación se describen brevemente cada una de ellas:

a) Velocidades particulares de corte

La velocidad de corte influye de un modo sensible sobre las vibraciones; a un aumento de la velocidad tienden casi siempre a aumentar las vibraciones; también ocurre a velocidades bajísimas. En circunstancias singulares, como la robustez de la máquina, según afirman algunos experimentadores, un aumento de la velocidad puede atenuar vibraciones preexistentes.

b) Avances bajos y elevados

Los valores mínimos del avance deben evitarse, porque se puede manifestar una acción intermitente de corte con peligro de vibraciones por la discontinuidad de “agarre” sobre el filo de corte.

Los valores mínimos del avance dependen principalmente de la herramienta empleada. Cuando los valores son elevados, además de un esfuerzo mayor, se tiene sobre la herramienta una torsión que puede hacer perder la rigidez a la misma (Scoriazza, 1998).

2.3 Mecánica del proceso de torneado

En el proceso de torneado, están inmersas las fuerzas de torneado. Aunque las operaciones más comunes en corte son tridimensionales y de forma geométrica compleja, el simple caso de dos dimensiones en el corte ortogonal es usado para explicar el mecanismo general de quitar metal. En el corte ortogonal el material es removido por el filo que esta perpendicular a la dirección relativa de la herramienta con el movimiento de la pieza de trabajo. Los mecanismos más complejos tridimensionales oblicuos a la operación de corte, son usualmente evaluados por modelos de transformación geométrica y cinemática aplicados al proceso de corte ortogonal. La representación esquemática de las fuerzas de corte presentes en un proceso de maquinado se muestran en la Figura 2.1.

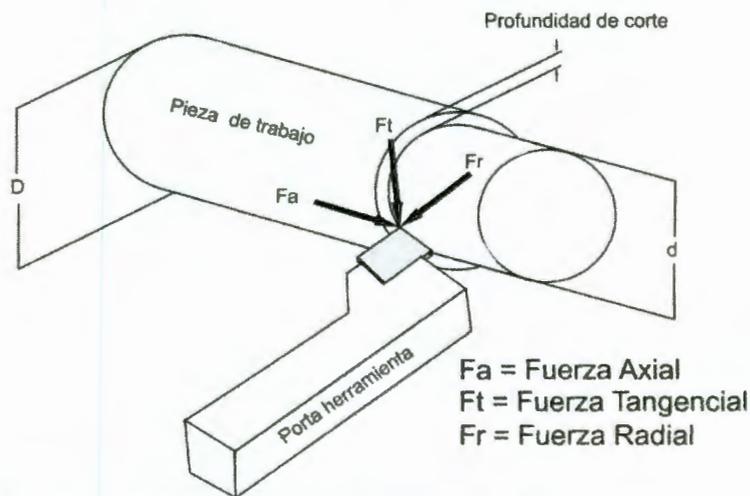


Figura 2.1 Fuerzas que actúan en un proceso de torneado.

El corte ortogonal se asemeja a un proceso de formado con una herramienta muy robusta, cuya arista de corte es perpendicular a la velocidad de corte. En el corte ortogonal, el corte se asume como uniforme a lo largo de la arista de corte. Las fuerzas de corte son ejercidas solo en la dirección de la velocidad y el espesor de la viruta quitada, la cual es llamada tangencial (F_t) y la fuerza de avance o axial (F_a) en la dirección de la velocidad de avance. Sin embargo, en el corte oblicuo, la arista de corte está orientada con un ángulo y la tercera fuerza adicional actúa en dirección de la fuerza radial (F_r).

2.4 Tipos de desgaste en la herramienta

El desgaste, reduce la vida de la herramienta, la calidad de la superficie maquinada y a su vez la exactitud dimensional, además, como consecuencia la economía de las operaciones de corte. En general, el desgaste de la herramienta es un proceso gradual. La rapidez del desgaste depende de los materiales de la herramienta y de la pieza, la forma de la herramienta, los fluidos de corte, los parámetros del proceso (como la velocidad de corte, avance y profundidad de corte) y de las características de la máquina herramienta. Los desgastes más comunes son el desgaste de flanco, el desgaste de cráter, el desgaste de muesca y el desgaste de nariz. Algunos de ellos se describen en las siguientes secciones.

2.4.1 Desgaste de flanco y de cráter

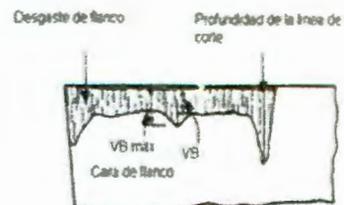
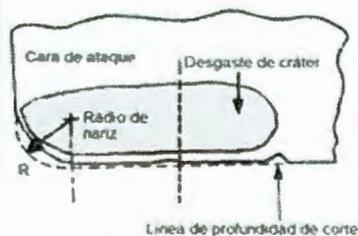
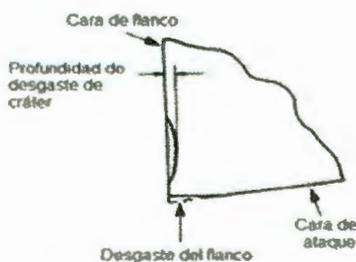
Los dos tipos de desgaste principales son el desgaste de flanco y el desgaste de cráter, los cuales son descritos a continuación:

a) Desgaste de flanco

El desgaste de flanco se presenta en superficies de incidencia de la herramienta como se puede observar en la Figura 2.2 y en general se atribuye a:

Frotamiento de la herramienta sobre la superficie maquinada que causa desgaste adhesivo y abrasivo.

Altas temperaturas, que afectan las propiedades del material de la herramienta y la superficie de la pieza.



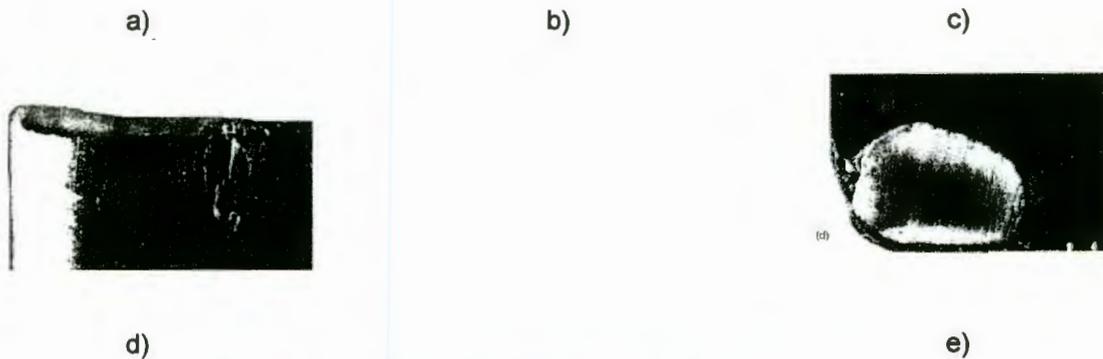


Figura 2.2 Tipos de desgaste en la herramienta.

Los tipos de desgaste en la herramienta se muestran en la Figura 2.2. Así, en la Figura 2.2a se observa el desgaste de flanco y de cráter, en una herramienta de corte. Esta herramienta se mueve hacia la izquierda. En la Figura 2.2b se muestra una vista de la cara de ataque de un buril de torneado, mostrando el radio de nariz y junto con la Figura 2.2d se ve el desgaste de cráter en esa cara de ataque. En las Figuras 2.2c y 2.2e se observa una vista de la cara de flanco de un buril de torneado, mostrando la pista de desgaste de flanco promedio (VB) y la línea de profundidad de corte (desgaste de muesca) según (Kalpakjian, 2002).

En un sentido clásico, debido a F. W. Taylor, en un artículo sobre aceros para maquinado, que se publicó en 1907, se estableció la relación aproximada mostrada en la Ecuación 2.3.

$$VT^n = C \quad \text{Ec. (2.3)}$$

En la que V es la Velocidad de corte, T es el tiempo en minutos que tardan en desarrollarse cierto desgaste en el flanco (VB en la Figura 2.2c), n es un exponente que depende de los materiales de herramienta y de la pieza, así como las condiciones de corte y C es una constante (Kalpakjian, 2002)

Para obtener una vida de herramienta constante, debe tomarse en consideración lo siguiente:

- a) Si se aumenta la rapidez de avance o la profundidad de corte, se debe disminuir la velocidad de corte y viceversa.
- b) Dependiendo de los exponentes, una reducción de la velocidad puede tener como consecuencia un aumento de material removido, por la mayor rapidez de avance o profundidad de corte.

b) Desgaste de cráter

Se presenta en la cara de ataque de la herramienta, Figura 2.3, ya que cambia la geometría de la interface entre viruta y herramienta, afecta el proceso de corte.

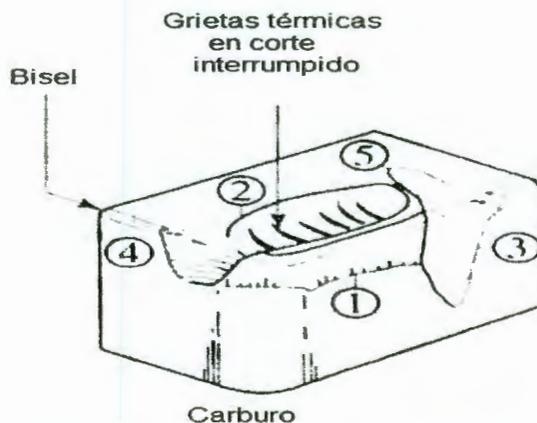


Figura 2.3 Desgaste de cráter (marcado con 2 en la figura).

Este tipo de desgaste se presenta con mayor frecuencia en mecanizados a altas velocidades. Los factores más importantes que influyen sobre el desgaste de cráter son:

- a) La temperatura en la interface herramienta-viruta.
- b) La afinidad química entre los materiales de la herramienta y la pieza, además de los factores que influyen sobre el desgaste de flanco también influyen sobre el desgaste de cráter.

También, se ha descrito el desgaste de cráter en términos de mecanismos de difusión, esto es, del movimiento de los átomos a través de la interface entre herramienta y viruta. Como la rapidez de difusión se incrementa al aumentar la temperatura, el desgaste de cráter se incrementa al aumentar la temperatura. (Kalpakjian, 2002).

2.4.2 Despostillamiento o fractura

Es el término que se usa para describir la rotura y expulsión de una pequeña parte del filo de la herramienta, fenómeno parecido a cuando se rompe la punta de un lápiz. Las partes despostilladas de la herramienta de corte pueden ser muy pequeñas (microdespostillado o macrodespostillado) o pueden ser relativamente grandes (despostillamiento grueso o fractura). A diferencia del desgaste, que es un proceso gradual, el despostillamiento da como resultado una pérdida repentina del material de la herramienta y un cambio correspondiente de forma, y tiene un gran efecto negativo sobre el acabado superficial, la integridad superficial y la exactitud dimensional de la pieza.

Dos causas principales del despostillamiento son el choque mecánico (impacto por interrumpir el corte, como cuando se talla o se tornea un eje estirado) y la fatiga térmica (variaciones cíclicas de temperatura de la herramienta en el corte interrumpido). Las grietas térmicas suelen ser perpendiculares al filo cortante de la herramienta (Figura 2.2a). El despostillamiento puede ser consecuencia de grandes inconsistencias en la composición del material de la pieza o en su estructura. El despostillamiento se puede presentar en una región de la herramienta donde ya existe una grieta o un pequeño defecto.

Los ángulos positivos grandes también pueden contribuir al despostillamiento, por el ángulo incluido pequeño de la punta de la herramienta. También, es posible que la región de desgaste de cráter avance hacia la punta de la herramienta, debilitándola y causando el despostillamiento. (Kalpakjian, 2002)

2.4.3 Viruta acumulada en el borde (*built-up-edge*)

En condiciones de corte particulares, usualmente en bajas velocidades de corte, la fricción entre la viruta y la herramienta es tan grande que el material se adhiere a la cara de la herramienta. La presencia de éste material incrementa la fricción y a su vez la fricción continúa acumulando capas de material de la viruta como se muestra en la Figura 2.4. El resultado de una acumulación de material es al que se le conoce como *built-up-edge*, algunas veces el *built-up-edge* continua creciendo en tamaño hasta que se desprende cuando se vuelve inestable, la trayectoria que el material desprendido sigue es entre la superficie inferior de la viruta y la superficie nueva de la pieza de trabajo, por lo cual la superficie se ve afectada con rugosidad. (Kalpakjian, 2002).



Figura 2.4 Viruta acumulada en el borde (*built-up-edge*).

2.4.4 Observaciones generales sobre el desgaste de herramienta

A causa de muchos factores que influyen en las características de la máquina herramienta y la calidad de una herramienta fabricada por determinado proveedor, el comportamiento del desgaste en la herramienta de corte, varía mucho. Además de los procesos de desgaste ya mencionados, hay otros fenómenos que también contribuyen a los patrones de desgaste de la herramienta (Figura 2.3).

Por ejemplo, por la disminución del esfuerzo de cedencia a altas temperaturas generadas durante el corte, las herramientas se pueden ablandar y sufrir deformación plástica. En general, esta clase de deformación se presenta al maquinar metales y aleaciones de alta resistencia. En consecuencia, las herramientas deben ser capaces de mantener su resistencia y su dureza a las temperaturas elevadas que se desarrollen en el corte.

El desgaste de ranura o de muesca en la herramienta de corte (Figura 2.3) se ha atribuido a que esta región es la frontera donde la viruta ya no está en contacto con la herramienta. Esta frontera, llamada también línea de profundidad de corte, oscila, por la variaciones inherentes en la operación de corte, y acelera el proceso de desgaste. Además, esta región está en contacto con la superficie maquinada del corte anterior. Como una superficie maquinada puede desarrollar una capa delgada endurecida por el trabajo, este contacto podría contribuir a la formación del desgaste de muesca, (Kalpakjian, 2002).

2.5 Causas de vibración en el proceso de torneado

En general en las máquinas herramientas se hallan siempre “sistemas” de masas en movimiento sujetas a vibraciones forzadas o bien propias. Las primeras son circunstanciales, mientras que las segundas tienen un carácter periódico, o sea mantenidas con suministro continuo de energía vibrante, así, de no haber amortiguamiento, se pueden tener vibraciones periódicas forzadas, o con resonancia, que son los casos peores para el trabajo.

Las causas que dan lugar a las vibraciones, pueden ser provocadas desde el exterior o producidas en la misma máquina. Para este segundo motivo pueden tener su origen en:

1. Desequilibrios dinámicos de masas en movimiento.
2. Engranajes defectuosos (perfil o ejecución irregular).
3. Movimientos irregulares en los soportes de rodaje.
4. Medios no apropiados de transmisión.

5. Irregularidades por bombas, roces, etc.

Mientras en el primer caso no queda más remedio que compensar bien las masas o actuar convenientemente sobre el número de revoluciones, en el segundo es necesario poner el debido cuidado en el ajuste y en el montaje de los engranes con que se va a trabajar. Las vibraciones producidas por los engranajes parten generalmente de frecuencias que corresponden al número de revoluciones de las ruedas mismas y alcanzan valores altísimos, como pueden también formar ondas armónicas de frecuencia muy baja; en consecuencia es fácil la excitación de diversas partes de la máquina y en particular de aquellas más próximas a tales mecanismos.

También los soportes de los rodamientos pueden producir vibraciones que parten de frecuencias parecidas al número de revoluciones del eje, para alcanzar frecuencias superiores de 3 a 5 veces: se tiene así una frecuencia elevada peligrosa para los soportes en cuestión. Los medios de transmisión mediante correas de cuero o de goma se han de tener presentes cuando se intente evitar las vibraciones: por tanto, se deben excluir las uniones pesadas y deben verificarse las tensiones en la tracción motor al variar el esfuerzo tangencial y el número de revoluciones. Otros inconvenientes de vibración pueden ser originados por columnas de líquido que se mueven dentro de tuberías: máquinas con mandos hidráulicos, o con instalaciones de refrigeración. Variando la longitud de la columna líquida, se pueden excitar o poner en resonancia diversas partes de la máquina en una forma análoga a lo que se ha visto a propósito de los engranajes.

También los roces diversos pueden producir vibraciones: se debe poner cuidado en la lubricación, en el montaje y en el control de las diversas partes de la máquina.

En los muy diversos casos en los cuales se manifiestan vibraciones en partes de la máquina (y que resultan nocivas al buen funcionamiento y conservación de las mismas) debe ser observado y comprobado el resultado

último referente a las vibraciones relativas entre la pieza y la herramienta, o sea la posibilidad de trabajo sobre la máquina, por cuanto no siempre las vibraciones llegan a producir efectos nocivos en el arranque de material.

Además de las causas imputables a la máquina, se pueden tener fuentes de vibraciones por la acción simultánea de la máquina y el proceso de corte, esto es, en relación al modo de trabajar de la herramienta y al esfuerzo no constante que ofrece el material, como asperezas, estructuras diversas, etc. Debe darse necesariamente mucha importancia a la búsqueda de los fenómenos de vibración, especialmente cuando se controla una nueva máquina, o bien cuando se deben emplear herramientas especiales.

A tal objeto se controlan las características de las vibraciones sobre las partes esenciales de la máquina a través de la lectura de la frecuencia y de la intensidad. Distinguidos los casos de frecuencia periódica, se pasa a controlar el valor en Hz, y según esquemas de orientación, a particularizar si se trata de flexiones o torsiones (50/500 Hz), o bien de vibraciones producidas por partes de la máquina como la base, cajas de cambio, etc. (500/5.000 Hz). Si las vibraciones no tienen amplitud constante, o bien el gráfico es de forma irregular, la causa o causas excitatrices pueden ser golpes casuales, y por lo tanto, el problema resulta más complejo debiéndose realizar la búsqueda por tanteos.

Además de las fuentes de vibraciones indicadas imputables a la máquina se generan otras vibraciones debidas al ambiente y más aún al propio proceso del corte. Las causas que producen estas vibraciones pueden ser:

1. Movimientos vibratorios provenientes del exterior.
2. Funcionamiento irregular de la máquina
3. Fijación irregular de la pieza
4. Fijación irregular de la herramienta
5. Altura del filo de la herramienta.

En todos los casos de vibración, cualquiera que sea su origen, se tiene una condición perjudicial a la eficiencia y empleo de la máquina, cuyos órganos están sujetos a esfuerzos excesivos con el consiguiente peligro de producirse en ellos “principios” de roturas por la acción vibratoria repetida.

2.5.1 Movimientos vibratorios provenientes del exterior

Para amortiguar las vibraciones nocivas producidas por causas externas y que varían de dirección en brevísimo tiempo, se ha de tener presente que:

Para golpes producidos por martinetes, mazos, etc., es preciso colocar bajo el torno una fundación grande apoyada sobre un estrato elástico, de forma que las puntas de intensidad elevada tiendan a transmitirse a través de la fundación de masa elevada, con acciones de intensidad menor, si bien de mayor duración. De este modo las vibraciones llegarán muy debilitadas y, en general, reducidas, de forma que no producirán disturbios en el trabajo.

Para golpes producidos por fuerzas periódicas, como masas en rotación no contrapesadas, prensas, máquinas a émbolos, embudidoras, etc., se ha de evitar que la frecuencia oscilatoria de la fundación entre en resonancia con la de la máquina dominante.

2.5.2 Funcionamiento irregular de la máquina

Las causas que producen vibraciones debidas a la máquina, pueden resultar bien distinguidas, si son debidas a una sola irregularidad; si en cambio concurren varios motivos en la formación de los efectos vibratorios, el análisis resulta obviamente más complejo. Las causas más comunes, fácilmente distinguibles pueden ser:

1. Mandril no apoyado bien los cojinetes
2. Carro del torno con juego excesivo por mal apoyo, o desgastadas las guías
3. Excesiva longitud del contrapunto: flexión elástica

4. Engranajes defectuosos

En todos estos casos es preciso controlar perfectamente las partes después de haber remplazarlos o substituir las defectuosas.

2.5.3 Fijación irregular de la pieza

La tendencia a manifestar vibraciones, también puede ser debida o agravada por la insuficiente rigidez de la pieza. De hecho se puede tener:

1. Ajuste imperfecto de la pieza entre los puntos
2. Movimiento de flexión y torsión en trozos muy delgados
3. Oscilaciones por falta de equilibrio de la pieza en rotación

Se puede remediar con el empleo de elementos adecuados, lunetas, contrapesos, etc. La que debe establecerse como estabilizador dinámico.

2.5.4 Fijación irregular de la herramienta

La fijación irregular de la herramienta puede favorecer, en gran manera, las vibraciones. Las precauciones a tomar son:

- a) Controlar que el apoyo inferior sea bien plano y rígido
- b) Controlar los tornillos y elementos de sujeción de la herramienta

Esta irregularidad fácilmente perceptible puede solucionarla rápidamente el operario.

2.5.5 Altura del filo de la herramienta

La herramienta puede estar dispuesta algo más elevada o baja, o a igual altura que el eje de rotación de la pieza. En general, es siempre aconsejable elevar ligeramente la herramienta con respecto al eje de rotación, así el flanco secundario, sobre el frente de la herramienta, mantiene una presión constante

sobre la pieza en rotación; esto para evitar que vibre como podría suceder si se colocase la herramienta por debajo del eje. Por tanto, en los trabajos de:

Desbastado exterior: resulta ventajoso situar la punta de corte, sobre el eje de torneado. Para ensayos de velocidad para desbastado se fija un 2% del diámetro de la pieza. Para materiales durísimos se puede llegar también al 6%, para obligar a la punta a mantenerse bien apoyada al frente.

Desbastado interno: aquí se debe tener en cuenta principalmente la flexión que sufre el cuello de la herramienta. La punta de la herramienta debe ser forjada y dispuesta en el espacio interno, de forma que bajo el esfuerzo no se pueda nunca sobrepasar la medida del radio máximo que deba realizar, también debe disponerse por encima del eje de rotación de la pieza.

Acabado: dado el reducido esfuerzo y reduciéndose el peligro de vibraciones, se puede disponer la punta de la herramienta exactamente sobre el eje. Es lógico que al utilizar herramientas invertidas se invierten también las posiciones del filo respecto al eje de la pieza. Con herramientas a Inclinación negativa y positiva, colocadas en posición horizontal y elevadas respecto al eje de rotación alrededor del diámetro de torneado, se reducen, o casi anulan, los ángulos de inclinación inferiores principal y secundario, y aumentan en consecuencia los ángulos de inclinación transversal.

Los ángulos reales y de desviación con la elevación de la herramienta sufren una reducción. Contrariamente a lo anterior, con plaquitas de cerámica sintetizada, se aconseja mantener la punta cortante por debajo del eje de rotación. También en casos particulares, como cuando se trabajan superficies cóncavas, rugosas, conviene situar la herramienta más baja que el eje de torneado (Scoriazza, 1998).

2.6 Tipos de sensores para medición de aceleración

Los diferentes tipos de sensores que se utilizan para la medición de las vibraciones son principalmente de cuatro tipos:

- a) Sensor de desplazamiento relativo con contacto (LVDT).
- b) Sensor de desplazamiento relativo sin contacto (capacitivos o inerciales, MEM's).
- c) Sensor de velocidad o velocímetro.
- d) Sensor de aceleración o acelerómetro.

En las secciones siguientes, se describen algunos de ellos:

2.6.1 Sensor de desplazamiento relativo con contacto (LVDT)

El transformador diferencial de variación lineal, más conocido por la abreviatura LVDT (Linear Voltage Differential Transformer) está formado por tres devanados espaciados de manera simétrica a lo largo de un tubo aislado. El devanado de en medio es el primario y los otros son secundarios idénticos conectados en serie de manera que sus salidas se oponen entre sí. Como resultado del movimiento que se monitorea, a través del tubo central se desplaza un núcleo magnético.

Si en el devanado primario se alimenta un voltaje alterno, en los devanados secundarios se inducirán F.E.M.S (Fuerza Electro-Motriz) alternas. Si el núcleo magnético está en el centro, la cantidad de material magnético de los devanados secundarios es la misma. Por lo tanto, las F.E.M.S inducidas en ambos devanados será la misma, y dado que están conectados de manera que sus salidas se oponen entre sí, la salida neta es cero.

Sin embargo, cuando el núcleo se desplaza desde su ubicación central en uno de los devanados habrá mayor porción del núcleo magnético que en el otro, por ejemplo, mayor cantidad en el devanado secundario 2 que en el devanado 1. En consecuencia, en uno de los devanados se induce una mayor f.e.m. que en el

otro y de ambos se obtiene una salida neta. Dado que a mayor desplazamiento habrá mayor proporción del núcleo en un devanado que en el otro, la salida, que es la diferencia entre las dos F.E.M.'s aumenta a medida que el desplazamiento monitoreado sea mayor. Para obtener un voltaje de salida específico para cada valor del desplazamiento es necesario diferenciar los casos en que las amplitudes son iguales, pero las diferencias de fase sean 180° . Para ello se utiliza un demodulador sensible a la fase dotado de un filtro pasa bajas, el cual convierte la salida a un voltaje de corriente directa, asignando éste un valor específico a cada uno de los desplazamientos. Este tipo de circuitos ya existe en forma de circuito integrado (W. Bolton 2001).

2.6.2 Sensor de elemento capacitivo

La capacitancia C de un capacitor de placas paralelas está dada por la expresión 2.4:

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad \text{Ec. (2.4)}$$

Donde ϵ_r es la constante de permitividad relativa del material dieléctrico que está entre las placas, ϵ_0 es una constante conocida como constante dieléctrica del espacio libre, A es el área de superposición de dos placas y d es la separación entre placas. Los sensores capacitivos para monitorear desplazamientos lineales se basan en que una de las placas se mueva debido un desplazamiento. En un desplazamiento que modifica la distancia que separa las placas, si la separación d aumenta por un desplazamiento en x , la capacitancia se modifica de acuerdo a la Ecuación 2.5:

$$C - \Delta C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d + x} \quad \text{Ec. (2.5)}$$

Por lo tanto, el cambio de la capacitancia ΔC expresado como una fracción de la capacitancia inicial está dado por la expresión 2.6:

$$\frac{\Delta C}{C} = -\frac{d}{d+x} - 1 = \frac{x/d}{1+(x/d)} \quad \text{Ec. (2.6)}$$

Es decir, la relación entre el cambio en la capacitancia ΔC y el desplazamiento x es no lineal; esta no linealidad se puede eliminar utilizando lo que se conoce como *sensor de desplazamiento asimétrico*. Este sensor cuenta con tres placas: el par superior forma un capacitor y el inferior otro. Como el resultado del desplazamiento, la placa central que está en medio de las placas restantes se mueve. El movimiento de esta placa origina un aumento de la distancia que separa el capacitor de arriba y una disminución de la separación respecto del capacitor de abajo.

La estructura de un acelerómetro del tipo capacitivo se puede observar en la Figura 2.5

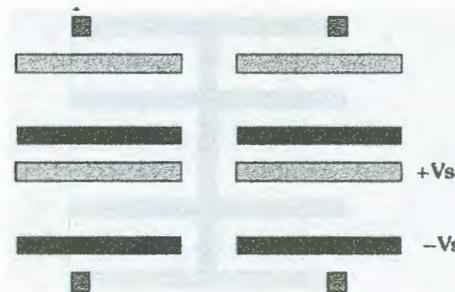


Figura 2.5 Estructura del acelerómetro capacitivo.

2.6.3 Sensor de aceleración o acelerómetro (basado en tecnología MEM'S)

La aceleración del marco de referencia (sistema no inercial) equivale a una fuerza sobre la masa en el marco fijo, esto se muestra en la Figura 2.6.

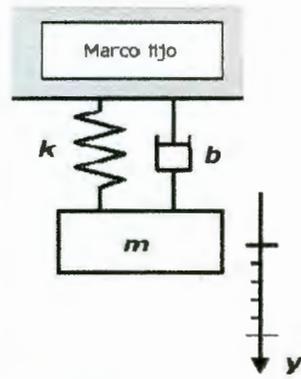


Figura 2.6 Modelo del acelerómetro.

El modelo matemático se presenta en las Ecuaciones 2.7 a 2.9:

$$F_a = ma \quad \text{Ec.(2.7)}$$

$$F_a = by - k\dot{y} = m\ddot{y} \quad \text{Ec. (2.8)}$$

$$ma = m\ddot{y} + b\dot{y} + ky \quad \text{Ec. (2.9)}$$

Donde a es la aceleración que se desea medir

Por otra parte, en la figura 2.7 se presenta el diseño de varios acelerómetros.

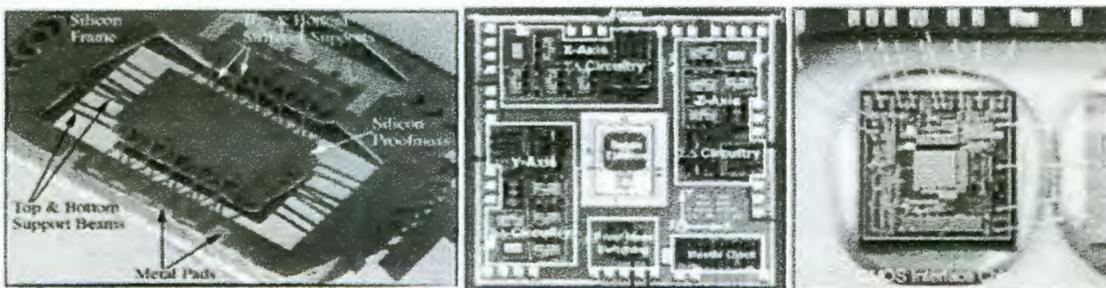


Figura 2.7 Diseño de acelerómetros.

Para la medición de vibraciones en el exterior de las máquinas y en las estructuras, hoy en día se utilizan fundamentalmente los acelerómetros (Figura

2.7). El acelerómetro tiene la ventaja respecto al velocímetro de ser más pequeño, tener mayor rango de frecuencia, y poder integrar la señal para obtener velocidad o desplazamiento vibratorio. El sensor de desplazamiento se utiliza para medir directamente el movimiento relativo del eje de una máquina respecto a su descanso. Para la selección adecuada del sensor se debe considerar, valor de la amplitud a medir, temperatura de la superficie a medir y fundamentalmente el rango de las frecuencias a medir. La Tabla 2.2 indica los rangos de frecuencias de sensores de vibraciones típicos.

Tabla 2.2 Rango de frecuencias de transductores de vibración típicos.

Tipo de transductor	Rango típico de frecuencia (Hz)
Desplazamiento sin contacto	0 - 10.000
Desplazamiento con contacto	0 - 150
Velocímetro sísmico	10 - 1.000
Acelerómetro de uso general	2 - 7.000
Acelerómetro de baja frecuencia	0.2 - 2.000

Otro factor que debe tenerse en cuenta en la selección del sensor es el ruido eléctrico inherente a él. Por ejemplo, un acelerómetro de uso industrial tiene un ruido eléctrico típico de 500 *mg* pico, mientras que un acelerómetro de baja frecuencia sólo tiene un ruido eléctrico típico de 10 *mg* pico.

2.7 Técnicas de procesamiento de señales

Se puede decir que un filtro es un mecanismo que deja pasar señales con frecuencias determinadas, mientras que atenúa considerablemente las demás frecuencias. El diseño de los filtros se ocupa de hacer sistemas que tienen propiedades bien definidas. Se puede describir un problema como sigue: Dada algunas propiedades deseadas para un sistema, diseñar o encontrar la función de transferencia que cumpla con estas características. El motivo por el cual se desea conocer la función de transferencia, es que, a partir de esta, es más fácil deducir la

ecuación de diferencias. Una vez conocidas las ecuaciones, fácilmente se implementan a la situación según sean las necesidades.

2.7.1 Filtrado digital

Existen varias clasificaciones para los filtros, selectivos a la frecuencia respecto de los que son selectivos al tiempo (y la derivación e integración como un caso peculiar de filtrado). Una posterior clasificación necesariamente deberá considerar las características de comportamiento ideales. Un filtro ideal se define como aquel cuya fase varía linealmente en función de la frecuencia y su amplitud permanece constante para un determinado rango de frecuencias (sin distorsión), que constituyen su(s) banda(s) de paso, filtrando completamente las frecuencias restantes, que constituye(n) su(s) banda(s) de paso o de rechazo. Dependiendo de la posición, número y distribución de estas bandas, se pueden tener varios tipos de filtros.

Básicamente, existen 5 tipos de filtros digitales ideales:

1. Los filtros pasa bajas (*lowpass*)
2. Los filtros pasa altas (*highpass*)
3. Los filtros de pasa bandas (*bandpass*)
4. Los filtros rechaza bandas (*stopband*)
5. Los filtros pasa todo (*all Pass*).

-Filtros pasa bajas: Son aquellos que sólo permiten el paso de las bajas frecuencias, desde la corriente directa DC hasta una frecuencia de corte f_c , y eliminan todas las frecuencias mayores a ésta.

-Filtros pasa altas: Impiden el paso de las bajas frecuencias, desde el DC hasta una frecuencia de corte f_c , y permiten el paso de todas las frecuencias mayores a ésta.

-Filtros pasa bandas: Sólo permiten el paso de un limitado rango de frecuencias comprendidas entre dos frecuencias: f_{ci} y f_{cs} (de corte inferior y superior, respectivamente), e impiden el paso de las frecuencias restantes.

-Filtros rechaza bandas: Impiden el paso de un rango de frecuencias comprendidas entre dos frecuencias de corte (inferior y superior), y permiten pasar las demás frecuencias.

-Filtros pasa todo: Son aquellos cuya amplitud es constante en una banda de interés.

2.7.1.1 Aproximación Butterworth

Una de las aproximaciones más simples, conocidas y empleadas es la del ingeniero británico S. Butterworth en 1930, quién propone como función generadora de la amplitud a: $f(n, \omega) = \omega^n$, de donde se desprende que su respuesta en amplitud resulta ser:

$$|H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + f(n, \omega)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^{2n}}} \quad \text{Ec. (2.18)}$$

Probablemente ésta sea la aproximación más natural, puesto que incluso se da de manera automática, como parte de la respuesta del famoso circuito RC o RL de primer orden, al igual que muchas de las otras aproximaciones, tienen como punto común esta coincidencia.

2.7.2 FFT (Transformada Rápida de Fourier)

A fines del siglo XIX comenzaba a gestarse el inicio de la teoría matemática que posteriormente sería utilizada en el procesamiento digital de señales. Un matemático francés llamado Joseph Fourier establecía que una señal o función podía ser representada como la suma, posiblemente infinita, de series de senos y cosenos (o en forma equivalente como exponenciales complejas). Éste postulado siguió evolucionando hasta los días de hoy donde la teoría de Fourier, más conocida como la transformada de Fourier, es ampliamente utilizada en la resolución de problemas científicos e ingenieriles en diferentes campos tales como física cuántica, óptica, electrónica, astronomía, acústica y muchos otros. Desde un punto de vista más ingenieril o físico la transformada de Fourier puede ser descrita

como un fenómeno físico más que como una herramienta matemática. Las señales pueden ser interpretadas como una combinación lineal de ondas armónicas o tonos puros por lo que se observa de una manera casi intuitiva que la señal en un instante de tiempo es reemplazada por la suma de varios tonos puros. De acuerdo con esto la transformada de Fourier utiliza dos funciones bases, las cuales son seno y coseno, para poder expandir o representar una señal o función en términos de ellas.

Las técnicas de análisis de Fourier de tiempo continuo son ampliamente útiles para analizar y conocer las propiedades de las señales y sistemas de tiempo continuo. Del mismo modo, las técnicas del análisis de Fourier de tiempo discreto son de igual manera útiles en el estudio de señales y sistemas de tiempo discreto.

El origen del análisis de tiempo continuo se atribuye a las investigaciones realizadas sobre los problemas de la física matemática en el siglo XVIII, mientras que las herramientas para analizar señales de tiempo discreto tienen raíces diferentes. En particular sus conceptos y métodos resultan fundamentales para la disciplina del análisis numérico, las fórmulas para el procesamiento de conjuntos de datos puntuales, para producir aproximaciones numéricas de la interpolación, integración y diferenciación eran investigadas desde los tiempos de Newton. Esto proporcionó un segundo entorno en el cual se realizó gran parte del trabajo inicial sobre señales y sistemas de tiempo discreto.

En los años 40 y 50 se obtuvo un gran desarrollo en las técnicas de tiempo discreto y en particular en el uso de las herramientas del análisis de Fourier. Éste impulso se debió al incremento en el uso y en la capacidad de las computadoras digitales y el desarrollo de métodos de diseño de sistema de datos muestreados, es decir, sistemas de tiempo discreto para el procesamiento de señales muestreadas de tiempo continuo.

Estos sistemas en general requieren del cálculo de numerosas transformadas de Fourier, las cuales en ese entonces provocaban una carga

computacional fuera de los límites. Sin embargo, la computadora digital proporcionó posibilidades para que se iniciara el trabajo de investigación sobre codificadores digitales de voz, analizadores digitales de espectros con la esperanza de que resultaran sistemas prácticos. Finalmente a mediados de los años 60 se desarrolló un algoritmo mejor conocido como la transformada rápida de Fourier o FFT (Fast Fourier Transform), el cual demostró ser totalmente adecuado para una implementación digital eficiente y redujo considerablemente el tiempo de computación para las transformadas. Con esta herramienta muchas ideas interesantes, pero poco prácticas, se convirtieron en aplicaciones reales.

El anterior contexto histórico proporciona un marco coherente para el análisis de señales y sistemas de tiempo discreto. Existen varias similitudes entre las técnicas del análisis de Fourier de tiempo discreto y de tiempo continuo, por ejemplo, las razones básicas de la utilidad de representar señales en términos de exponenciales complejas son las mismas para ambos análisis. En particular, si la entrada y la salida de un sistema lineal e invariable en el tiempo de tiempo discreto son expresadas como combinaciones lineales de exponenciales complejos, entonces los coeficientes de la representación de la salida pueden ser expresados en términos de los coeficientes de la combinación lineal que representa la entrada.

Por otro lado existen ciertas diferencias, la representación en serie de Fourier de una señal periódica de tiempo discreto es una serie finita. De hecho, la FFT depende de manera intrínseca de esta finitud y por consecuencia es un concepto de tiempo discreto.

El algoritmo para la FFT explota las propiedades de simetría de la exponencial compleja discreta en el tiempo para reducir el número de multiplicaciones. Para evaluar una transformada discreta de Fourier con N muestras el algoritmo de la FFT encuentra su eficiencia cuando N es una potencia de 2. Esta restricción no afecta el uso práctico de la FFT ya que la longitud de $h(n)$ puede ser incrementada a la siguiente potencia de 2 aumentando el número adecuado de ceros.

Debido a la naturaleza discreta del índice de tiempo para señales de tiempo discreto, el escalamiento en tiempo y en frecuencia asume una forma diferente con respecto a la de tiempo continuo. Sea $x(n)$ una señal con espectro $X(\omega)$. Consideremos la transformada $Y(\omega)$ de $y(n)$.

$$Y(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} y(n)e^{-j\omega n} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(-n)e^{-j\omega n} \quad \text{Ec. (2.19)}$$

Sustituyendo $m=-n$ en la ecuación 1 obtenemos que:

$$Y(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)e^{-j\omega m} = X(-\omega) \quad \text{Ec. (2.20)}$$

Esto es, aplicando la transformada de Fourier:

$$x(-n) \leftrightarrow X(-\omega) \quad \text{Ec. (2.21)}$$

Aunque la ecuación 3.10 es análoga al caso de tiempo continuo, las diferencias surgen cuando tratamos de escalar en tiempo y frecuencia en lugar de invertir el eje de tiempo. El resultado que puede ser paralelo a la ecuación correspondiente al análisis de tiempo continuo es el siguiente:

$$X(k)(n) = x(n/k) \quad \text{Ec. (2.22)}$$

Si n es un múltiplo de k

$$X(k)(n) = 0 \quad \text{Ec. (2.23)}$$

Si n no es un múltiplo de k

Sea k un entero positivo y definamos la señal, entonces se considera el algoritmo analítico de decimación para la FFT. Consideremos $h(n)$ para n mayor que cero y menor que $N - 1$, dividiremos la transformada discreta de Fourier en dos sumatorias: una para las muestras pares y otra para las muestras impares, de la siguiente manera.

$$\begin{aligned}
 H(k) = & \sum_{n=0}^{\left(\frac{N}{2}\right)-1} h(2n)e^{-j4\pi nk/N} \\
 & + \sum_{n=0}^{\left(\frac{N}{2}\right)-1} h(2n+1)e^{-j2\pi(2n+1)k/N}
 \end{aligned}$$

Ec. (2.24)

Ambas sumatorias aparecen en la forma de un punto de $N/2$. Consideremos a $h_p(n)$ como la secuencia para las muestras pares y $h_i(n)$ como la secuencia para las muestras impares. De la misma forma tendremos que $H_p(k)$ será la FFT para las muestras pares y $H_i(k)$ para las muestras impares. Considerando lo anterior tenemos que:

$$\begin{aligned}
 H(K) = & H_p(k) + e^{-j2\pi k / N} H_i(k)
 \end{aligned}$$

Ec. (2.25)

Esta técnica es comúnmente conocida como decimación. En realidad la decimación de las secuencias anteriores se puede continuar hasta llegar al punto en el que sólo se pueda tener una sola muestra por sumatoria. Es necesario, como ya se había mencionado anteriormente que el número de muestras es una potencia de 2, es claro que de lo contrario la técnica anterior sería de poca utilidad. Para lograr siguientes decimaciones las dos sumatorias obtenidas de la primera decimación serán ahora consideradas como expresiones originales de

$H(k)$ y serán por lo tanto sujetas a sus propias decimaciones a partir de sus muestras pares e impares.

La técnica de decimación en efecto reduce el número de cálculos que se debe realizar para llegar a un resultado final al realizar una DFT (Discret Fourier Transformer), sin embargo esta reducción es realmente significativa cuando el número de muestras es muy grande.

2.7.3 Cálculo del valor RMS

El valor RMS (Root Mean Square, Raíz Cuadrática Media) proviene del procedimiento matemático para determinar el valor efectivo de cualquier onda. Primero, se encuentra el cuadrado de la onda, y en seguida el valor medio, calculando el área bajo el cuadrado de la curva y dividiendo entre el periodo T. Enseguida se obtiene la raíz cuadrada del valor resultante el cual es igual al valor efectivo (Boylestad y Nashelsky, 1997). De aquí que para una señal discreta x , el valor RMS puede calcularse mediante la Ecuación (2.26) y para una señal continua x , el valor RMS se calcula con la Ecuación (2.27)

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n x_i^2}{n}} \quad \text{Ec.(2.26)}$$

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{\int P(x)x^2 dx}{\int P(x) dx}} \quad \text{Ec.(2.27)}$$

3. METODOLOGÍA

En el presente trabajo, se analiza el efecto del desgaste de la herramienta de corte y las señales de vibración en un proceso de torneado particular. Se trabaja a partir de resultados experimentales, en los cuales, se maquina acero al medio carbono AISI (1045) con un diámetro de pulgada y media (38 mm), insertos de carburo de tungsteno ya desgastados (desde nuevos, con desgaste medio y hasta los que presentan ruptura), utilizando un acelerómetro biaxial ubicado lo más cerca posible de la herramienta de corte. Posteriormente se realiza el procesamiento de las señales adquiridas.

3.1 Descripción del experimento

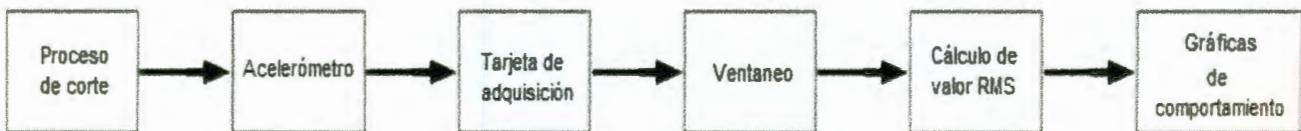


Figura 3.1 Diagrama a bloques de la experimentación.

En la Figura 3.1, se muestra el diagrama a bloques de la metodología a seguir, misma que se describe a continuación:

Las pruebas experimentales son llevadas a cabo en un torno de control numérico automatizado en la Facultad de Ingeniería Electromecánica (Figura 3.2 a). En este torno, el primer paso consiste en la instrumentación de un acelerómetro de tecnología MEMS (Micro Electro Mecanismos) sobre el portaherramientas, con la finalidad de medir las vibraciones en el proceso de corte. Este acelerómetro se instala en un área lo más cercana al inserto. Para esto, se diseña y construye un adaptador que permite proteger y mantener fijo el instrumento durante las pruebas, además con ello, evitar posibles daños, caída o movimientos indeseables de este (Figura 3.2 b).

También, para la realización de las pruebas, es necesario diseñar los experimentos, los cuales consisten en la selección de diversos insertos con diferente grado de desgaste, mismo que se mide a través de un microscopio óptico equipado con una cámara y seguido de procesamiento de imágenes. Posteriormente, la señal obtenida del acelerómetro es parametrizada (convertida a digital) con ayuda de una tarjeta de adquisición OMEGA CIO-DAS08 de 12 bits de resolución. La frecuencia de muestreo se fija en 3.3 kSPS (kilo Samples Per Second, kilo muestras por segundo).



Figura 3.2 a) Torno CNC utilizado. b) Instrumentación del acelerómetro.

3.2 Instrumentación y sujeción del acelerómetro

Se eligió un acelerómetro biaxial MMA3201D debido a su rango de operación, bajo costo y fácil implementación. De la hoja de datos se obtienen las especificaciones de conexión, parámetros de trabajo, sensibilidad, etc. En la Figura 3.3a se muestra el encapsulado y en la Figura 3.3b el diagrama de conexión con resistencias y capacitores recomendados por el fabricante. De acuerdo a esto, se utiliza el software ORCAD para la realización del PCB (Printed Circuit Board, Diagrama de Circuito Impreso) correspondiente. Cabe mencionar

que todos los elementos utilizados son de montaje superficial, lo que reduce en gran medida el espacio utilizado en el diagrama PCB mostrado en la Figura 3.3 c.

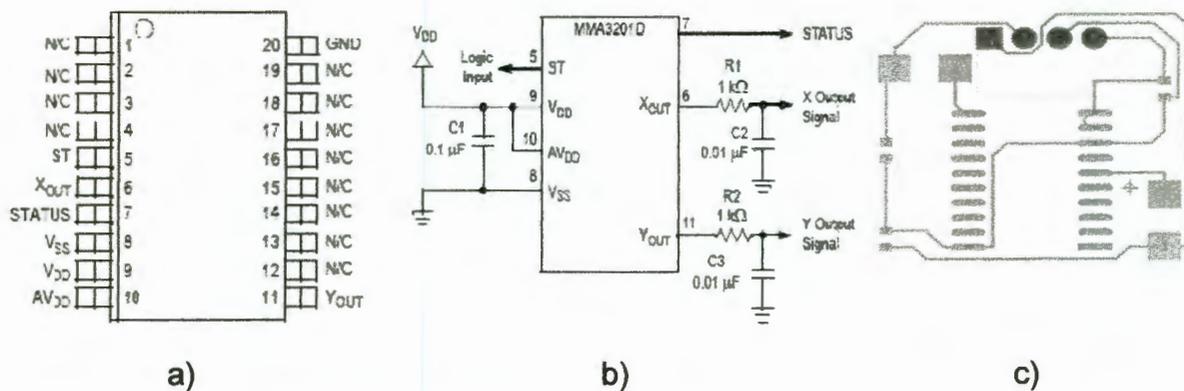


Figura 3.3 Acelerómetro a) Encapsulado b) Diagrama de conexión y c) Diagrama PCB.

Como se mencionó, el acelerómetro es biaxial, por lo que para lograr medir la aceleración en la dirección de las tres fuerzas, axial, radial y tangencial, el acelerómetro se instala según se muestra en la Figura 3.4a), donde se mide la aceleración en dirección de las fuerzas axial y radial, F_a y F_r , respectivamente. Luego, en otra serie de experimentos con los mismos parámetros de corte se coloca el acelerómetro de forma que se midan las fuerzas tangencial F_t y radial F_r . Como el ciclo de cilindrado es un corte ortogonal, solo dos de las fuerzas actúan de forma significativa, la axial F_a y la tangencial F_t , por lo que se espera que en los datos obtenidos de aceleración en el sentido de estas fuerzas se vea reflejado este hecho. En la Tabla 3.1 se muestra la forma en que están etiquetados los ejes del torno, los ejes del acelerómetro y su relación con el sentido de las fuerzas de corte.

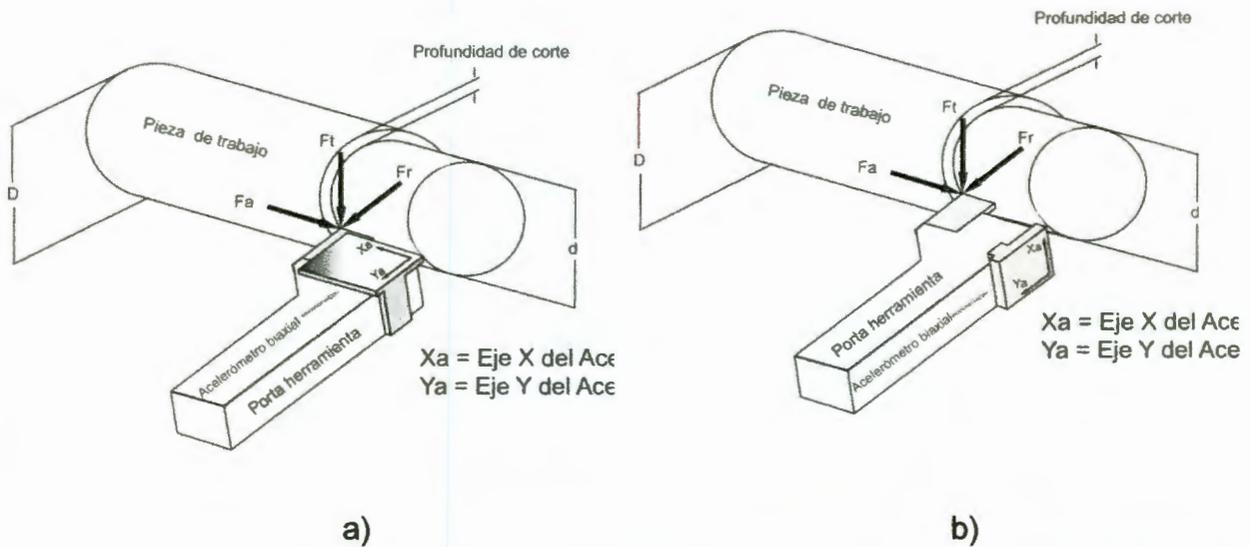


Figura 3.4. Configuración experimental en a) Medición de aceleración en el sentido de las fuerzas F_a y F_r . b) Aceleración en el sentido de las fuerzas F_a y F_t .

Tabla 3.1. Relación entre ejes acelerómetro y del torno.

Fuerza	Eje del torno	Eje del Acelerómetro
Axial (F_a)	Y_t	X_a
Radial (F_r)	X_t	Y_a
Tangencial (F_t)	Z_t	Z_a

3.3 Clasificación de insertos y medición del desgaste de la herramienta

En cuanto a la clasificación de insertos, se eligieron insertos de carburo de tungsteno de la marca Mitsubishi SNMG433MA con recubrimiento de TiCN (Nitruro-Carburo de Titanio) y Al_2O_3 (Óxido de Aluminio) debido a que estos tienen desgaste gradual provocado por su uso en los procesos de manufactura de una industria local. Esto permite trabajar con insertos que han sido utilizados con condiciones que se manejan en la industria y a su vez, evita la necesidad de desgastar cada inserto desde el inicio hasta su ruptura.

Para hacer la selección de los insertos a utilizar, primero se requiere de un microscopio óptico Nikon Epiphot 200, con el que cuenta el laboratorio de metalografía de la Facultad de Ingeniería, mismo que es mostrado en la Figura 3.5. Este equipo permite tomar micrografías debido a una cámara SONY conectada a él. Los mejores acercamientos fueron logrados con una lente de 50x.



Figura 3.5 Microscopio Nikon Epiphot 200.

A los insertos con los que se trabaja, se les asigna una notación con el fin de identificar cada uno de los flancos y así poder llevar un control sobre cada prueba.



Figura 3.6 Clasificación de inserto para cada lado.

En la Figura 3.6, se puede ver que el inserto tiene marcas en cada esquina justo después de la perforación, que sirve para su sujeción al porta insertos. De esta manera, el lado A del inserto 1 es el que muestra la secuencia asignada al

flanco 0, 1, 2, 3 en sentido contrario a las manecillas del reloj comenzando en la esquina inferior izquierda. En esta posición, se gira el inserto 180 grados verticalmente y ahora, la secuencia que aparecería, sería 0, 1, 2, 3 pero comenzando por la esquina superior izquierda. En este sentido, una prueba etiquetada con PA22 correspondería a la siguiente descripción:

PA22

P = Prueba.

A = Lado del inserto.

2 = Número de inserto.

2 = Número de flanco.

Con el objeto de contar con un parámetro de comparación entre las vibraciones y el desgaste de la herramienta, se requiere de la obtención del desgaste en forma cuantitativa. Así, para medir el área de desgaste de flanco, se auxilió de un software de procesamiento de imágenes. A continuación se describe el procedimiento a seguir para la realización de dicho cálculo.

- a) Se abre la imagen en el programa y se realiza el marcado manual del área de desgaste, como se muestra en la Figura 3.7. El software trabaja con imágenes en escalas de grises de formato BMP.



Figura 3.7 Programa de procesamiento de imágenes.

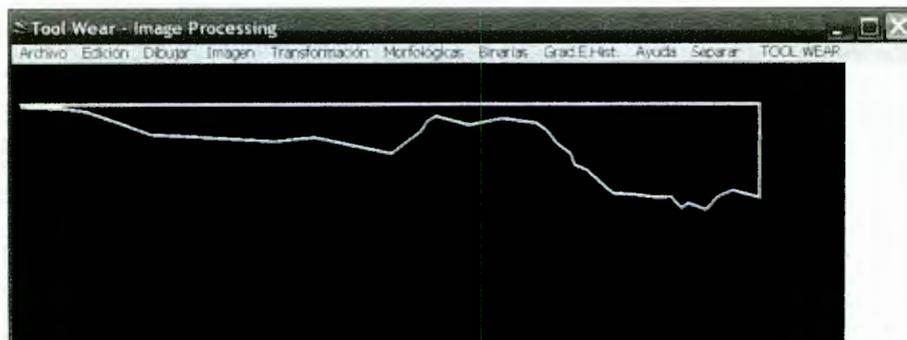
- b) En el menú se tiene la opción de *Tool-wear*, se selecciona para moverse a la opción *tool wear* y se mostrará la ventana de la Figura 3.8. Previo al cálculo del área de desgaste, se requiere una umbralización (conversión de escalas de grises a blanco y negro), un función de relleno y un filtrado de áreas.



Figura 3.8 Ventana para cálculo de área de desgaste.

- c) Una vez realizada la umbralización que se muestra en la Figura 3.9a, se procede a rellenar el área con la opción que se encuentra en: *Menú/Tool Wear/rellenar*. Cuando se termina de utilizar el comando da como resultado la Figura 4.7b, lo cual le permitirá al programa hacer el cálculo de área.

a)



b)



Figura 3.9 Procesamiento de imágenes. a) Umbralización y b) rellenado de área.

- d) Si en el proceso de umbralización quedan pequeñas áreas distintas de la marcada, el programa automáticamente las elimina con un filtro de áreas, utilizando como criterio el no dejar pasar áreas no mayores a cierta cantidad de píxeles, esta cantidad se fija en el cuadro de control de edición "áreas en píxeles mayores de:" y el valor queda a criterio de la persona que procesa la imagen.
- e) De esta manera, en la Figura 3.10 se muestra cual es el resultado obtenido para el inserto en cuestión, así, el área de desgaste es de: 0.650554 mm^2 .

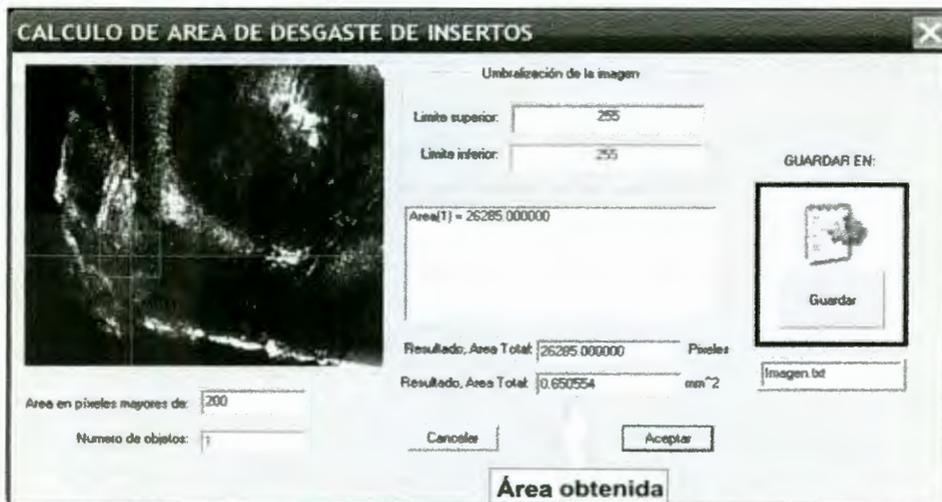


Figura 3.10 Resultado de área calculada por el programa.

Con este procedimiento, se calculan las áreas desgastadas de diversos flancos de varios insertos. De aquí, para efecto de la experimentación, se

seleccionan diez de ellos los cuales, representan insertos desde sin desgaste o mínimo desgaste hasta los que tienen mayor área de desgaste. La gráfica de los valores obtenidos es mostrada en la Figura 3.11.

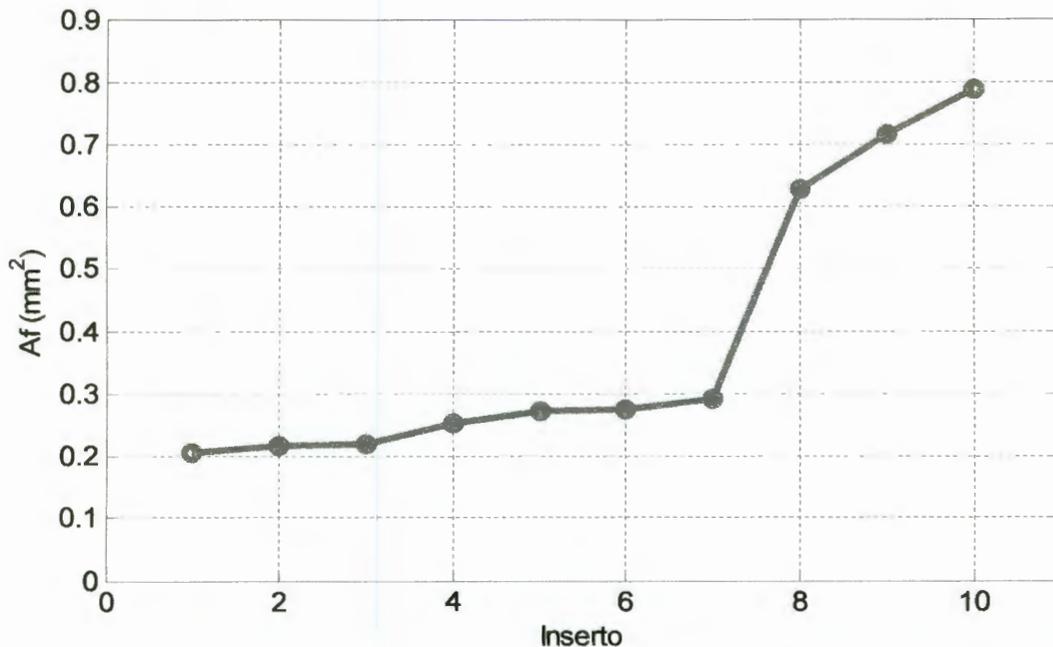


Figura 3.11. Gráfica del área de desgaste para los 10 insertos seleccionados.

3.4 Cálculo de parámetros de corte

Las condiciones de maquinado se calcularon de acuerdo con la Figura 4.4. Puesto que se sabe que los problemas prematuros de desgaste del inserto ocurren a velocidades de corte altas, se propone una velocidad de corte V_c igual a 1.2 m/s o 72 m/min , esto da un avance f igual a 0.17 mm/rev . Se conoce el diámetro (\emptyset) de la pieza de trabajo que es de 38 mm .

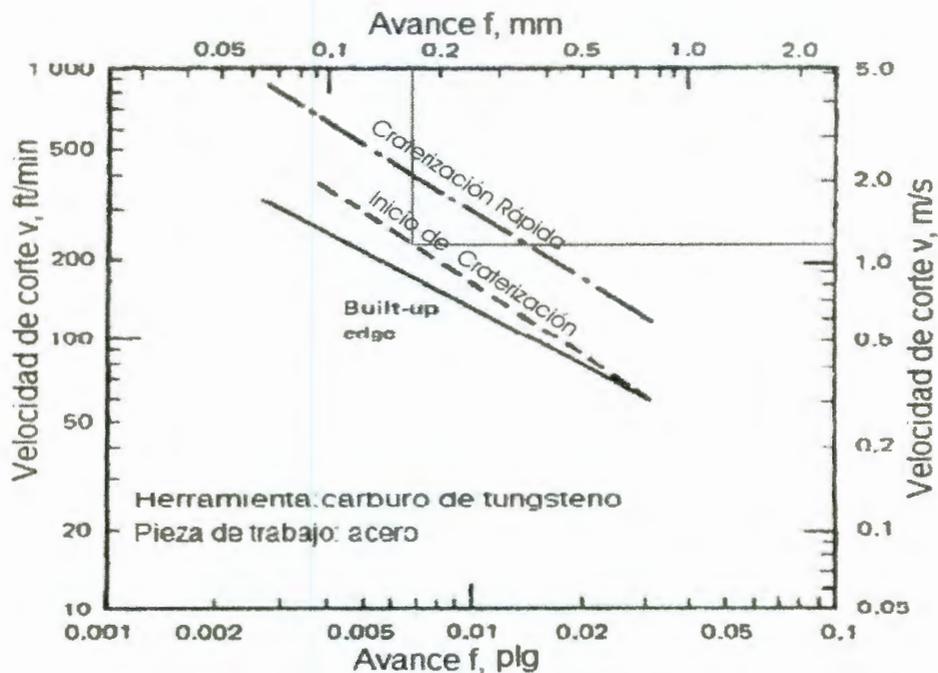


Figura 3.12 Diagrama de desgaste para herramientas de carburo de tungsteno.

De esta manera, las revoluciones del husillo serían de 603.15 de acuerdo a la Ecuación 3.1:

$$N = \frac{v}{\pi * \phi} * 60\text{seg} = \frac{1.2 \text{ m/s}}{\pi * 0.038\text{m}} * 60\text{seg} = 603.15 \text{ RPM} \quad \text{Ec. (3.1)}$$

Y la velocidad de avance V_f se calcula en función de N y el avance por revolución (Ecuación 3.2):

$$\begin{aligned} v_f &= f * \text{RPM} = 0.17 * 603.15 \\ &= 102.53 \text{ mm/min} \end{aligned} \quad \text{Ec. (3.2)}$$

Con los cálculos anteriores se fijó la velocidad del husillo en 600 RPM, la velocidad de avance en 100 mm/min y la profundidad de corte de 2 mm, además una longitud a maquinar de 30 mm (las condiciones se trabajan sin refrigerante). De esta forma, las condiciones de corte y la experimentación a realizar, pueden resumirse en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Condiciones de corte de la experimentación

Experimento	Velocidad de corte $V_c(m/min)$	Profundidad de corte $d(mm)$	Velocidad de avance $V_f(mm/min)$	Diámetro de la pieza $\emptyset(mm)$			Área de desgaste de flanco $A_f(mm^2)$
1	72	2	100	38	34	30	0,20493
2							0,21624
3							0,21985
4							0,25304
5							0,27126
6							0,27539
7							0,29059
8							0,62751
9							0,71762
10							0,78873

Por otra parte, el material de la pieza de trabajo elegida es una barra de acero AISI 1045 (American Iron and Steel Institute, Instituto Americano del hierro y del acero) conocida como al medio-carbono. Puede señalarse que en su producción se pone especial cuidado en la composición química, tratamiento, laminado y acabado superficial, etc. Como resultado de este cuidadoso procedimiento, se obtiene un acero sumamente útil para cualquier tipo de aplicación y tratamiento que se le quiera dar. Este acero particularmente cuando se temple, puede ser usado donde se requiera de una extraordinaria dureza que sólo puede ser obtenida por aceros de medio-carbono. Algunas de sus aplicaciones pueden ser en: ejes para rueda, partes para máquina que tengan un desgaste excesivo, pernos, mordazas, piñones, engranes, trituradores, dados, etc.

3.5 Adquisición de señales de vibración

Esto se lleva a cabo mediante un software con el que cuenta el torno CNC. Este programa puede verse en la Figura 3.13 el cuál contiene los controles

básicos para maquinado, así como un módulo que permite la adquisición de señales y otro para su procesamiento.

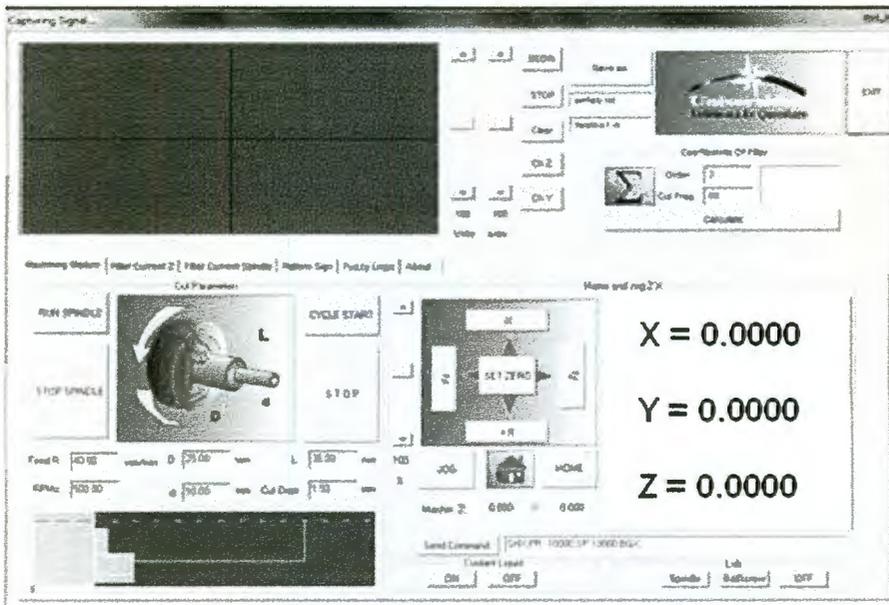


Figura 3.13 Pantalla de software con el que cuenta el torno CNC.

Con el uso de este programa, se adquieren las señales de vibración y se guardan en el disco duro de la computadora en archivos de texto. Estos archivos pueden ser utilizados en el mismo programa o bien en Matlab o Excel para su procesamiento. En la Figura 3.14 se muestra la señal de vibración, del eje X del acelerómetro, obtenida para tres ciclos de cilindrado.

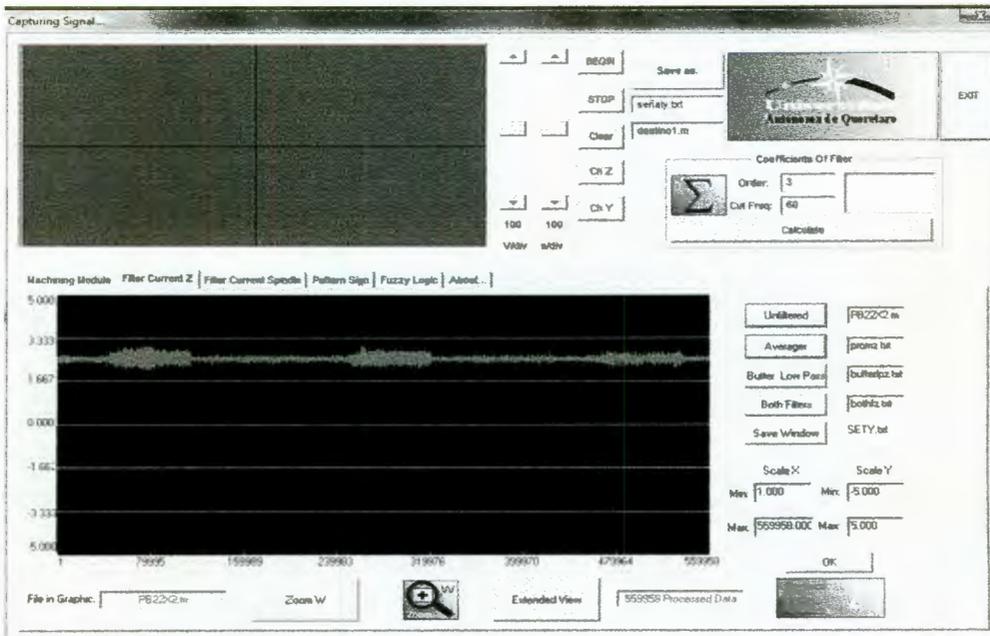


Figura 3.14. Señal de vibración obtenida para tres ciclos de cilindrado eje X.

De la misma manera, en la Figura 3.15 se muestra el comportamiento de la señal de vibración para el eje Z del acelerómetro, el cual visiblemente es de mayor amplitud que el del eje X adquirido.

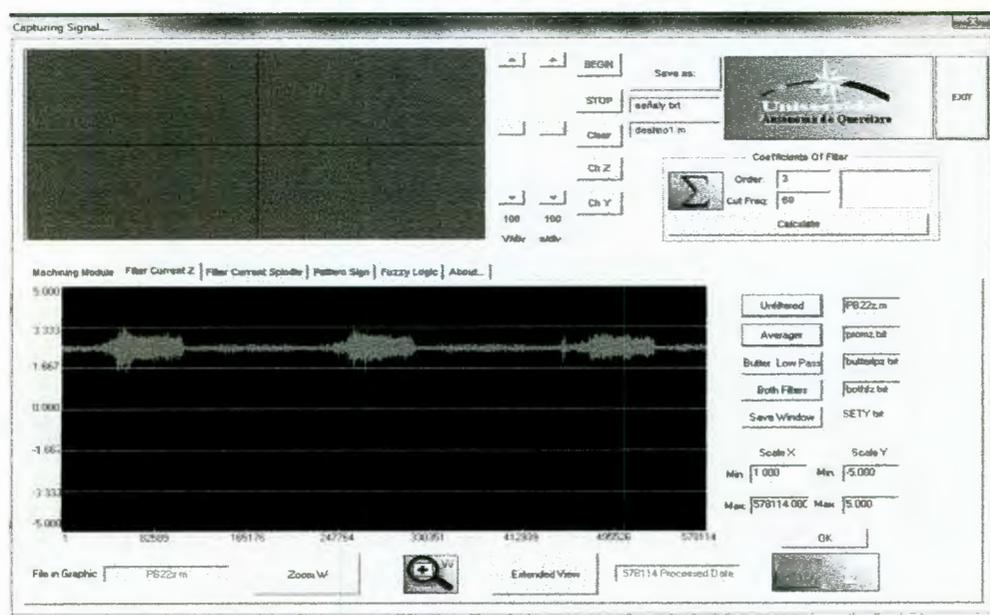


Figura 3.15 Señal de vibración obtenida para tres ciclos de cilindrado.eje Z

Cabe mencionar que estos datos adquiridos son valores de voltaje, por lo que para su posterior procesamiento y análisis, se requiere de la conversión a m/s^2 . Esto puede lograrse a partir de la resolución del sensor, el cual indica ser de 50 mV/g , además de un *offset* aproximado de 2.5 V a un valor de 0 g .

3.6 Filtrado digital y ventaneo en tiempo

Como es sabido, un ciclo de cilindrado consiste de un movimiento de aproximación a la pieza, un periodo donde se realiza la remoción de material y un movimiento de retorno. Con la finalidad de tomar en cuenta solo el periodo donde se realiza el corte, las señales de vibración obtenidas (los tres ejes X_a , Y_a y Z_a) y la señal resultante R_a , definida en la Ecuación 3.3, de tres ciclos de cilindrado (Figura 3.16) son filtradas con el fin de verificar, de forma más exacta, los puntos donde el proceso de corte comienza a realizarse. El filtro utilizado es una aproximación butterworth (filtro pasa bajas), mismo que está disponible en Matlab (Figura 3.16a). Este filtrado se lleva a cabo solamente para este efecto y no repercute en lo absoluto en la señal a procesar, por lo que el orden y la frecuencia de corte utilizadas son fijadas de forma empírica. Posteriormente, se aplica un ventaneo en tiempo (Figura 3.16b). Esto se logra multiplicando la señal de vibración por la ventana, la cual es cero en el periodo donde no se realiza ningún corte y uno cuando si se realiza el corte. De esta manera, solo la señal resultante (Figura 3.16c) se toma en cuenta para el cálculo posterior del valor RMS.

$$R_a = \sqrt{X_a^2 + Y_a^2 + Z_a^2} \quad \text{Ec.(3.3)}$$

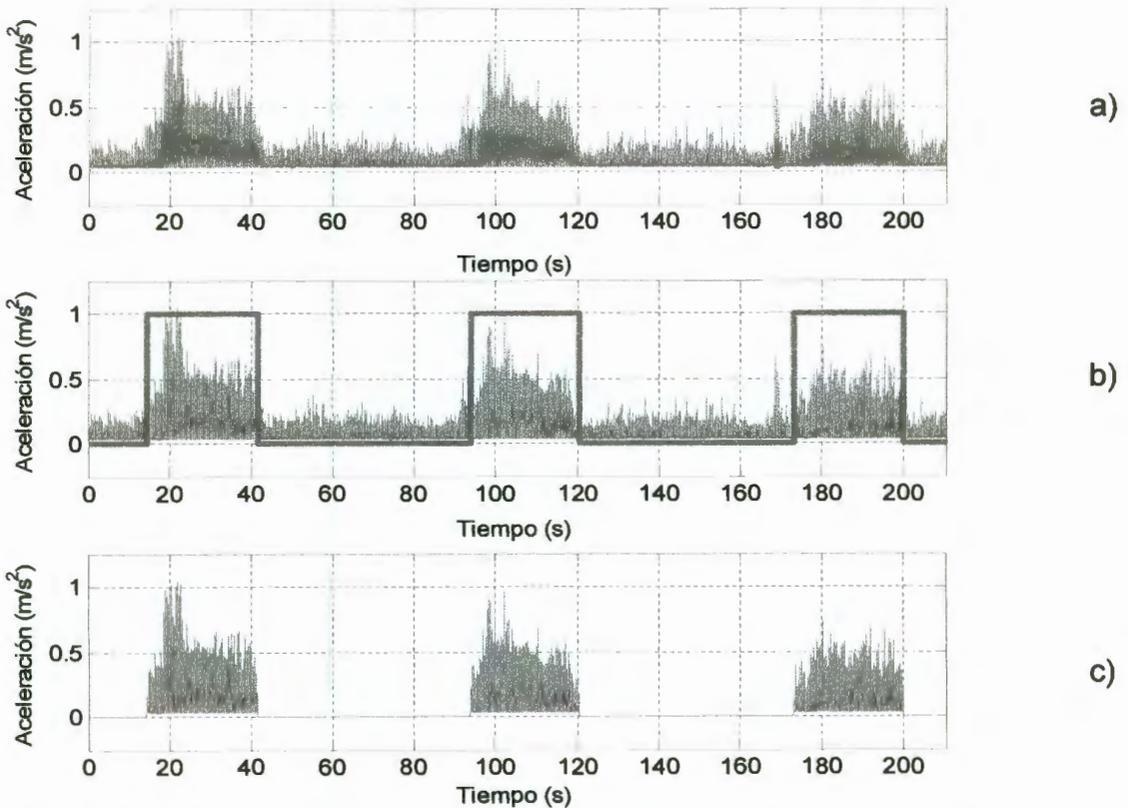


Figura 3.16 Filtrado digital y ventaneo en tiempo de la señal de vibración.

3.7 Valor RMS

Finalmente el valor RMS de la aceleración resultante, R_{rms} , y de cada componente X_{rms} , Y_{rms} , Z_{rms} , se calcula y se registra para cada una de las secciones de las señales donde se efectúa el proceso de corte. El valor R_{rms} puede ser calculado mediante la Ecuación 3.4. Los valores X_{rms} , Y_{rms} , Z_{rms} se calculan de forma similar.

$$R_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n r_i^2}{n}} \quad \text{Ec.(3.4)}$$

Donde r es el i -ésimo dato en el vector R_a y n es el número total de datos contenidos en dicho vector.

la señal de vibración para un inserto con desgaste intermedio, en el cual se observa claramente el aumento en la detección de la aceleración, debido a las perturbaciones detectadas por el acelerómetro, teniendo un resultado de aceleración que va de 80 a 100 m/s^2 para este inserto. Finalmente, en la Figura 4.2c se observa una variación más amplia en las señales obtenidas con un inserto en muy mal estado, la cual muestra una variación de la aceleración entre 150 a 200 m/s^2 en algunos puntos máximos de la señal obtenida. En las resultantes se puede apreciar un poco más los rangos mencionados de trabajo para las tres condiciones.

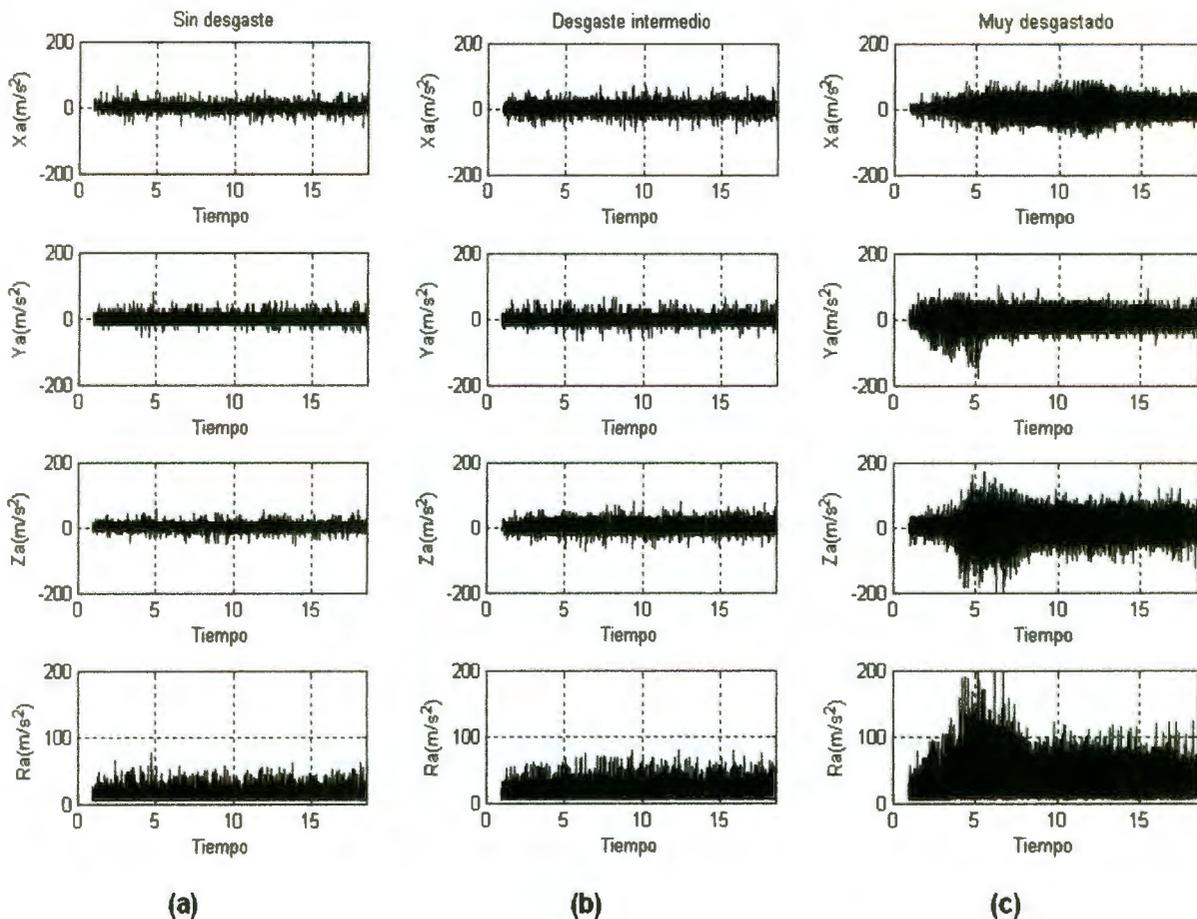


Figura 4.2 Gráficas de aceleraciones y resultantes para distintos insertos. a) sin desgaste, b) desgaste medio y c) muy desgastado.

Por otra parte, en la gráfica de la Figura 4.3 se muestran los valores X_{rms} obtenidos para el eje X_θ . Estos valores son resultado de la conversión a m/s^2 de la

pieza es menor. Esto puede deberse a que mientras el diámetro disminuye, la cantidad de material a remover es mucho menor.

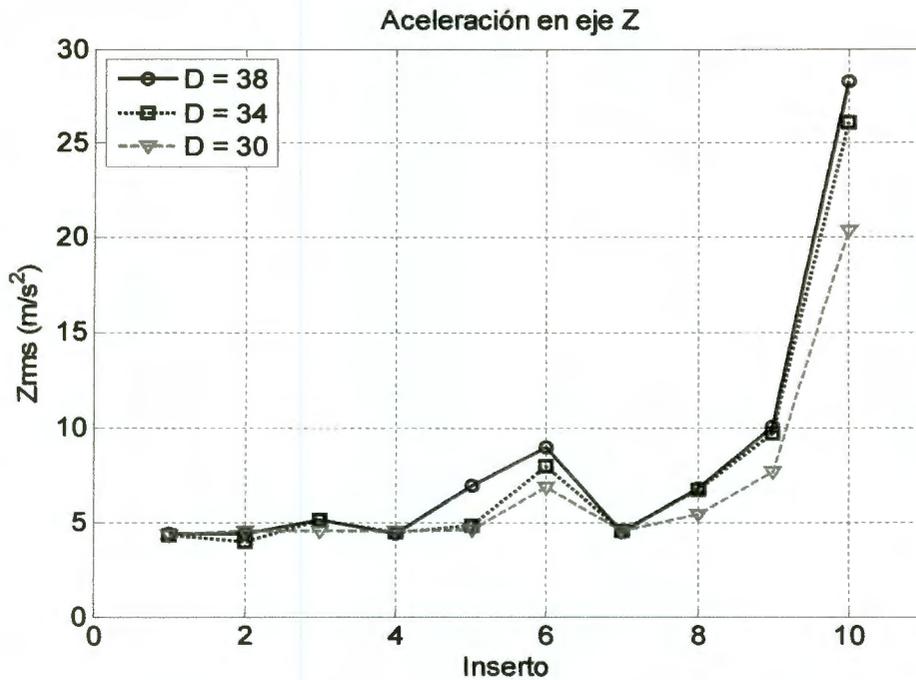


Figura 4.5 Aceleración en el eje Z (en el sentido de la Fuerza Tangencial).

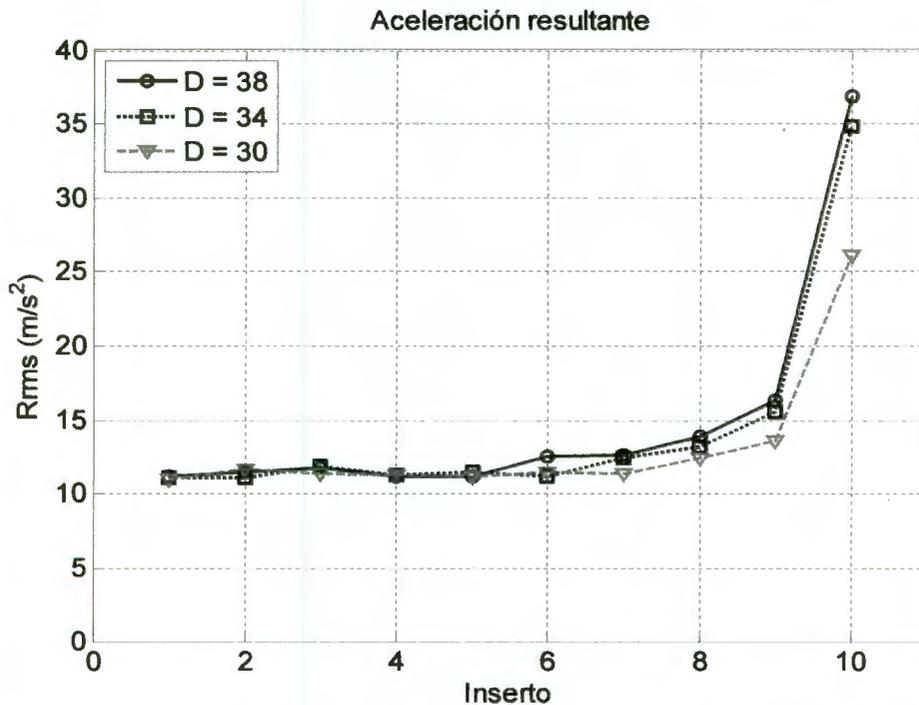


Figura 4.6. Aceleración resultante de las componentes X_{rms} , Y_{rms} y Z_{rms} .

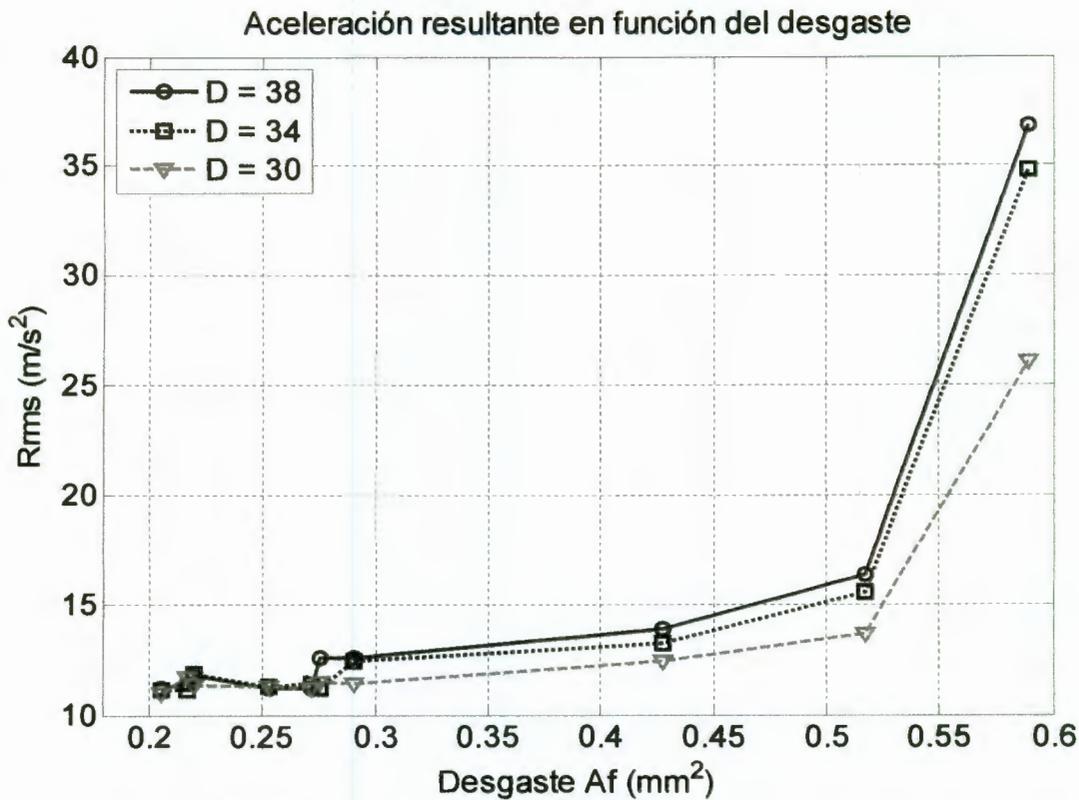


Figura 4.7. Aceleración en función del desgaste.

El comportamiento entre el desgaste y el valor resultante de las componentes de aceleración, se muestra en la Figura 4.7, dónde, a un mayor desgaste le corresponde un aumento en la aceleración. Si la herramienta de corte llega a sufrir ruptura, esta se vería reflejada inmediatamente en un incremento sustancial de las vibraciones. De esta manera, si se desea monitorear el estado de la herramienta a partir de vibraciones presentes en el proceso de corte, podría tomarse el valor RMS de la aceleración resultante como parámetro de monitoreo. Esto ayudaría al operador de la máquina herramienta a decidir el momento adecuado de cambiar la herramienta de corte por una nueva.

Finalmente, se obtiene la Transformada Rápida de Fourier de las señales adquiridas mediante su procesamiento en Matlab. Estos resultados son mostrados en la Figura 4.8 y solo se muestran para los insertos más representativos. En esta gráfica en tres dimensiones, puede verse que conforme el desgaste tiene un aumento, la amplitud de las vibraciones crecen también. Esto hace más notoria la visualización de algunas de las frecuencias presentes en el proceso de

maquinado. Dichas frecuencias, son alrededor de 7, 140, 210 y 415 Hz. La primera puede ser atribuida a las revoluciones por minuto utilizadas (600 rpm equivalente a 10 Hz). La adjudicación de las demás frecuencias a un elemento mecánico del torno en particular, sería a través de un análisis modal, lo que queda fuera del alcance de este trabajo.

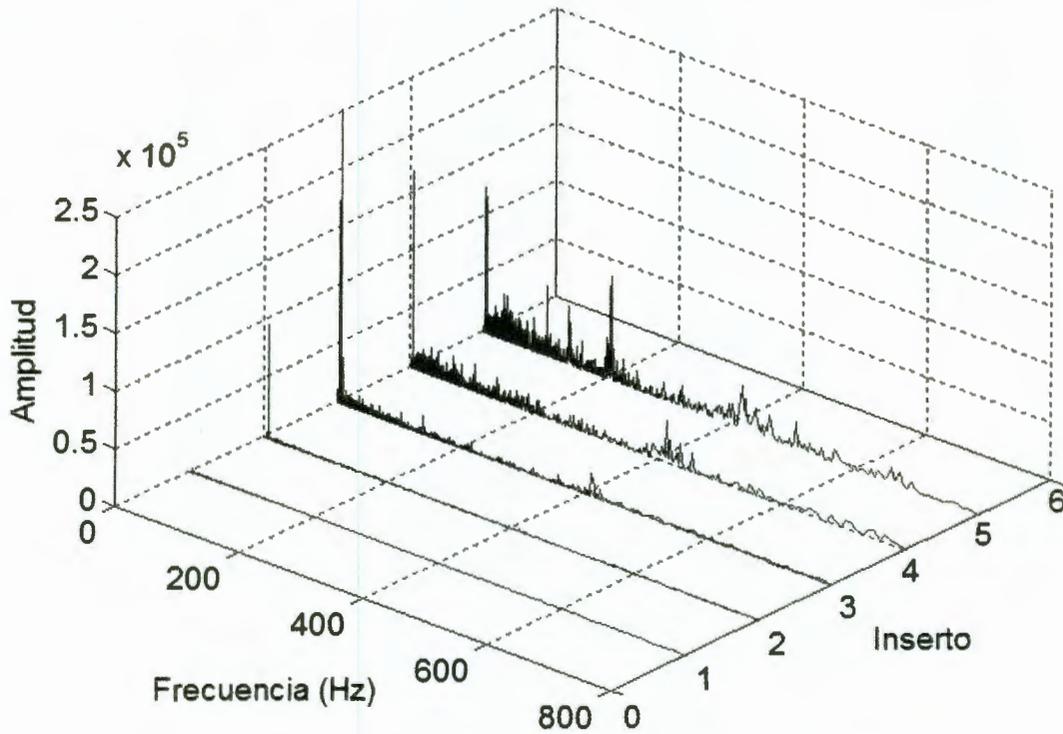


Figura 4.8.FFT para señales de vibración debido al maquinado con insertos de distinto grado de desgaste.

5. CONCLUSIONES

El análisis que se llevo a cabo fue con la finalidad de comprobar la relación que existe entre la vibración y el desgaste de la herramienta, lo cual fue encontrado mediante el procesamiento de las señales adquiridas a través del cálculo del valor RMS de la aceleración como parámetro. Se pudo observar que el desgaste más importante dentro del maquinado, es el que se encuentra en el flanco de la herramienta de corte, por lo que se baso el estudio en este desgaste, haciendo mediciones de áreas afectadas por éste. Se mostró que entre mayor es el desgaste de la herramienta de trabajo, mayor es la vibración que se refleja en el proceso de corte.

Los tres ejes son afectados, como se pudo ver en las gráficas de aceleración. El eje Y registra vibración pero por el tipo de corte ortogonal (ciclo de cilindrado) la señal que presenta es constante, por lo que se enfocó el análisis en los ejes X y Z. En dichos ejes se observó que las señales adquiridas sufren perturbaciones afectadas por el desgaste de la herramienta, esto es notorio en el sentido de la fuerza axial y la fuerza tangencial. De esta manera, si se desea monitorear el estado de la herramienta a partir de vibraciones presentes en el proceso de corte de cilindrado, podría tomarse el valor RMS de la aceleración resultante como parámetro de monitoreo. Ya que esto ayudaría al operador de la máquina herramienta a decidir el momento adecuado de cambiar la herramienta de corte por una nueva, si es que así lo requiere el trabajo que está desarrollando. Como se fue mostrando en los resultados obtenidos, se ve que las consideraciones que se tomaron en cuenta para este análisis, fueron adecuadas para tal propósito, obteniendo resultados satisfactorios.

Una recomendación para trabajos futuros es que sería ideal contar con un acelerómetro triaxial perfectamente encapsulado. Con esto, se podría monitorear fácilmente ciclos de corte oblicuo, donde actuarían las tres componentes de aceleración.

6. Referencias

Boothroyd Geoffrey, Winston A. Knight. Fundamentals of machining and machine tools, Ed. Marcel Dekker, Inc New York 1989

Boylestad Robert L., Louis Nashelsky. Fundamentos de Electrónica. Cuarta Edición, 1997, Pearson Education

Coromant Sandvik, "Mecanizado moderno: manual práctico", Sverige: Sandvik Coromant, 1994.

Denkena Harms, B., N. Lhermet. "Tool adaptor for active vibration control in turning operations" 9th International Conference on New Actuators, 14-16 June 2004, Bremen, Germany.

Dimla D.E. Sr. "On-line metal cutting tool condition monitoring, force and vibration analyses" International Journal of Machine tool & Manufacture 1999.

Groover Mikell P.. Fundamentos de manufactura moderna, materiales, procesos y sistemas, México: Ed. Prentice Hall, 1997.

Hoepli, "La herramienta y factores diversos para la rápida producción", Ed. Científico – Medica, 1998.

Hsu Hweip,. "Análisis de fourier", ed. Prentice Hall. 1987

Kalpakjian Schmid. Manufactura Ingeniería y tecnología, cuarta edición, México Ed. Prentice Hall 2002

Kibbe Richard R., Neely John E., Meyer Roland O., White Warrant T., Manual de máquinas herramientas Vol. 2, México Ed. Noriega Editores Limusa 1994

Krar, S. F.; Check, A. F. "Tecnología de las máquinas herramienta". Marcombo Boixareu Editores, México, 2002.

Lee E. C., C. Y. Nian, Y.S. Tarn. "Design of dynamic vibration absorber against vibrations in turning operations" *Journal of Materials Processing Technology* 108 (2001) 278-285.

López de Lacalle, L.N.; Sánchez. J.A.; Lamikiz, A. "Mecanizado de alto rendimiento, procesos de arranque". Ediciones técnicas Izaro, Bilbao, 2004.

Pallás Areny, Ramón "Sensores y acondicionadores de señal" , Ed. Alfaomega, marcombo 2001.

Pettersson Linus. *Vibrations in metal cutting*, Ronneby march 2002

Rufe, P.D. "Fundamentals of manufacturing". *Society of Manufacturing Engineers*, EE.UU. 2002.

Süleyman Yaldiz, Faruk Ünsacar. "A dynamometer desings for measurement the cutting forces on turning" *Journal of Measurement* 39(2006) 80-89.

Trejo Hernández Miguel. *Módulo de maquinado y monitoreo, aplicando control difuso en un proceso de torneado*, tesis de posgrado 2006

Ulloa Rojas, Raúl A, "Filtros" Ed. Universidad Iberoamericana, 2005.

W. Bolton. "Sistemas de control electrónico en ingeniería mecánica y eléctrica (Mecatrónica)" Alfaomega 2ª edición 2001

ANEXOS

Freescale Semiconductor
Technical Data

MMA3201D
Rev 4, 03/2006

Surface Mount Micromachined Accelerometer

The MMA3200 series of dual axis (X and Y) silicon capacitive, micromachined accelerometers features signal conditioning, a 4-pole low pass filter and temperature compensation, and separate outputs for the two axes. Zero-g offset full scale span and filter cut-off are factory set and require no external devices. A full system self-test capability verifies system functionality.

Features

- Sensitivity in two separate axes: 40g X axis and 40g Y axis
- Integral Signal Conditioning
- Linear Output
- Ratiometric Performance
- 4th Order Bessel Filter Preserves Pulse Shape Integrity
- Calibrated Self-test
- Low Voltage Detect, Clock Monitor, and EPROM Parity Check Status
- Transducer Hermetically Sealed at Wafer Level for Superior Reliability
- Robust Design, High Shocks Survivability

Typical Applications

- Vibration Monitoring and Recording
- Impact Monitoring
- Appliance Control
- Mechanical Bearing Monitoring
- Computer Hard Drive Protection
- Computer Mouse and Joysticks
- Virtual Reality Input Devices
- Sports Diagnostic Devices and Systems

MMA3201

**MMA3201D: X-Y AXIS SENSITIVITY
MICROMACHINED
ACCELEROMETER
±40g**



**D SUFFIX
EG SUFFIX (Pb-FREE)
20-LEAD SOIC
CASE 475A-01**

ORDERING INFORMATION			
Device Name	Temperature Range	Case No.	Package
MMA3201D	-40 to +125°C	475A-01	SOIC-20
MMA3201DR2	-40 to +125°C	475A-01	SOIC-20, Tape & Reel
MMA3201EG	-40 to +125°C	475A-01	SOIC-20
MMA3201EGR2	-40 to +125°C	475A-01	SOIC-20, Tape & Reel

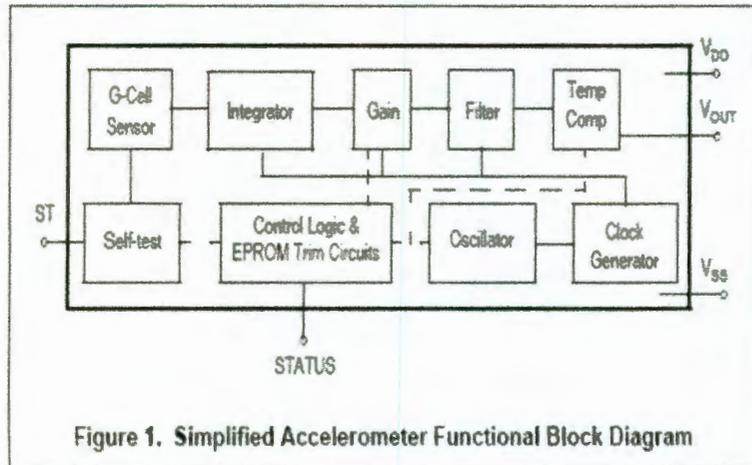


Figure 1. Simplified Accelerometer Functional Block Diagram

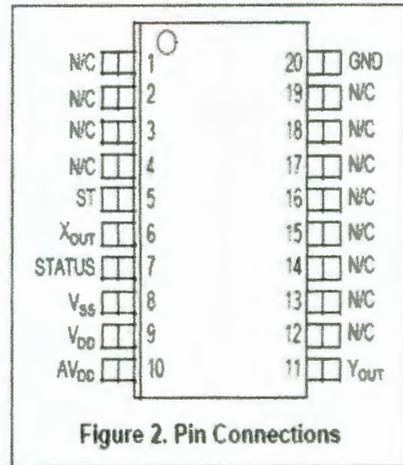


Figure 2. Pin Connections

Table 1. Maximum Ratings

(Maximum ratings are the limits to which the device can be exposed without causing permanent damage.)

Rating	Symbol	Value	Unit
Powered Acceleration (all axes)	G_{pd}	1500	g
Unpowered Acceleration (all axes)	G_{upd}	2000	g
Supply voltage	V_{DD}	-0.3 to +7.0	v
Drop Test ⁽¹⁾	D_{drop}	1.2	m
Storage Temperature Range	T_{stg}	-40 to +125	°C

1. Dropped onto concrete surface from any axis.

ELECTRO STATIC DISCHARGE (ESD)

WARNING: This device is sensitive to electrostatic discharge.

Although the Freescale accelerometers contain internal 2 kV ESD protection circuitry, extra precaution must be taken by the user to protect the chip from ESD. A charge of over 2000 volts can accumulate on the human body or associated test equipment. A charge of this magnitude can alter the

performance or cause failure of the chip. When handling the accelerometer, proper ESD precautions should be followed to avoid exposing the device to discharges which may be detrimental to its performance.

Table 2. Operating Characteristics

(Unless otherwise noted: $-40^{\circ}\text{C} \leq T_A \leq +105^{\circ}\text{C}$, $4.75 \leq V_{DD} \leq 5.25$, X and Y Channels, Acceleration = 0g Loaded output.⁽¹⁾)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Operating Range ⁽²⁾					
Supply Voltage ⁽³⁾	V_{DD}	4.75	5.00	5.25	V
Supply Current	I_{DD}	6	8	10	mA
Operating Temperature Range	T_A	-40	—	+125	$^{\circ}\text{C}$
Acceleration Range	g_{FS}	—	45	—	g
Output Signal					
Zero g ($T_A = 25^{\circ}\text{C}$, $V_{DD} = 5.0\text{ V}$) ⁽⁴⁾	V_{CFF}	2.35	2.5	2.65	V
Zero g	$V_{OFF,V}$	$0.46 V_{DD}$	$0.50 V_{DD}$	$0.54 V_{DD}$	V
Sensitivity ($T_A = 25^{\circ}\text{C}$, $V_{DD} = 5.0\text{ V}$) ⁽⁵⁾	S	45	50	55	mV/g
Sensitivity	S_V	9.3	10	10.7	mV/g/V
Bandwidth Response	f_{-3dB}	360	400	440	Hz
Nonlinearity	NL_{OUT}	-1.0	—	+1.0	% FSO
Noise					
RMS (.01 Hz – 1 kHz)	n_{RMS}	—	—	2.8	mVrms
Power Spectral Density	n_{PSD}	—	110	—	$\mu\text{V}/(\text{Hz}^{1/2})$
Clock Noise (without RC load on output) ⁽⁶⁾	n_{CLK}	—	2.0	—	mVpk
Self-Test					
Output Response	g_{ST}	9.6	12	14.4	g
Input Low	V_{IL}	V_{SS}	—	$0.3 \times V_{DD}$	V
Input High	V_{IH}	$0.7 \times V_{DD}$	—	V_{DD}	V
Input Loading ⁽⁷⁾	I_{IN}	-30	-110	-300	μA
Response Time ⁽⁸⁾	t_{ET}	—	2.0	—	ms
Status ^{(9), (10)}					
Output Low ($I_{load} = 100\ \mu\text{A}$)	V_{OL}	—	—	0.4	V
Output High ($I_{load} = 100\ \mu\text{A}$)	V_{OH}	$V_{DD} - 0.8$	—	—	V
Minimum Supply Voltage (LVD Trip)	V_{LVD}	2.7	3.25	4.0	V
Clock Monitor Fail Detection Frequency	f_{TRN}	50	—	260	kHz
Output Stage Performance					
Electrical Saturation Recovery Time ⁽¹¹⁾	t_{DELAY}	—	0.2	—	ms
Full Scale Output Range ($I_{OUT} = 200\ \mu\text{A}$)	V_{FSO}	0.25	—	$V_{DC} - 0.25$	V
Capacitive Load Drive ⁽¹²⁾	C_L	—	—	100	pF
Output Impedance	Z_O	—	300	—	Ω
Mechanical Characteristics					
Transverse Sensitivity ⁽¹³⁾	$V_{XZ,YZ}$	—	—	5.0	% FSO
Package Resonance	f_{PKG}	—	10	—	kHz

- For a loaded output the measurements are observed after an RC filter consisting of a 1 k Ω resistor and a 0.01 μF capacitor to ground.
- These limits define the range of operation for which the part will meet specification.
- Within the supply range of 4.75 and 5.25 volts, the device operates as a fully calibrated linear accelerometer. Beyond these supply limits the device may operate as a linear device but is not guaranteed to be in calibration.
- The device can measure both + and - acceleration. With no input acceleration the output is at midsupply. For positive acceleration the output will increase above $V_{DD}/2$ and for negative acceleration the output will decrease below $V_{DD}/2$.
- The device is calibrated at 20g.
- At clock frequency ± 70 kHz.
- The digital input pin has an internal pull-down current source to prevent inadvertent self test initiation due to external board level leakages.
- Time for the output to reach 90% of its final value after a self-test is initiated.
- The Status pin output is not valid following power-up until at least one rising edge has been applied to the self-test pin. The Status pin is high whenever the self-test input is high, as a means to check the connectivity of the self-test and Status pins in the application.
- The Status pin output latches high if a Low Voltage Detection or Clock Frequency failure occurs, or the EPROM parity changes to odd. The Status pin can be reset low if the self-test pin is pulsed with a high input for at least 100 μs , unless a fault condition continues to exist.
- Time for amplifiers to recover after an acceleration signal causing them to saturate.
- Preserves phase margin (60 $^{\circ}$) to guarantee output amplifier stability.
- A measure of the device's ability to reject an acceleration applied 90 $^{\circ}$ from the true axis of sensitivity.

PRINCIPLE OF OPERATION

The Freescale accelerometer is a surface-micromachined integrated-circuit accelerometer.

The device consists of a surface micromachined capacitive sensing cell (g-cell) and a CMOS signal conditioning ASIC contained in a single integrated circuit package. The sensing element is sealed hermetically at the wafer level using a bulk micromachined "cap" wafer.

The g-cell is a mechanical structure formed from semiconductor materials (polysilicon) using semiconductor processes (masking and etching). It can be modeled as a set of beams attached to a movable central mass that move between fixed beams. The movable beams can be deflected from their rest position by subjecting the system to an acceleration (Figure 3).

As the beams attached to the central mass move, the distance from them to the fixed beams on one side will increase by the same amount that the distance to the fixed beams on the other side decreases. The change in distance is a measure of acceleration.

The g-cell beams form two back-to-back capacitors (Figure 4). As the central mass moves with acceleration, the distance between the beams change and each capacitor's value will change, ($C = \epsilon NA/d$). Where A is the area of the facing side of the beam, ϵ is the dielectric constant, D is the distance between the beams, and N is the number of beams. The X-Y device contains two structures at right angles to each other.

The CMOS ASIC uses switched capacitor techniques to measure the g-cell capacitors and extract the acceleration data from the difference between the two capacitors. The ASIC also signal conditions and filters (switched capacitor) the signal, providing a high level output voltage that is ratiometric and proportional to acceleration.

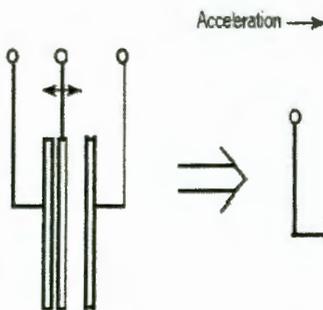


Figure 3. Transducer Physical Model

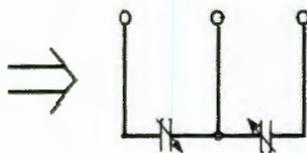


Figure 4. Equivalent Circuit Model

SPECIAL FEATURES

Filtering

The Freescale accelerometers contain an on board 4-pole switched capacitor filter. A Bessel implementation is used because it provides a maximally flat delay response (linear phase) thus preserving pulse shape integrity. Because the filter is realized using switched capacitor techniques, there is no requirement for external passive components (resistors and capacitors) to set the cut-off frequency.

Self-Test

The sensor provides a self-test feature that allows the verification of the mechanical and electrical integrity of the accelerometer at any time before or after installation. This feature is critical in applications such as automotive airbag systems where system integrity must be ensured over the life of the vehicle. A fourth "plate" is used in the g-cell as a self-test plate. When the user applies a logic high input to the self-test pin, a calibrated potential is applied across the self-test plate and the moveable plate. The resulting electrostatic force ($F_e = \frac{1}{2} AV^2/d^2$) causes the center plate to deflect. The resultant deflection is measured by the accelerometers control ASIC and a proportional output voltage results. This procedure assures that both the mechanical (g-cell) and electronic sections of the accelerometer are functioning.

Ratiometricity

Ratiometricity simply means that the output offset voltage and sensitivity will scale linearly with applied supply voltage. That is, as you increase supply voltage the sensitivity and offset increase linearly; as supply voltage decreases, offset and sensitivity decrease linearly. This is a key feature when interfacing to a microcontroller or an A/D converter because it provides system level cancellation of supply induced errors in the analog to digital conversion process.

Status

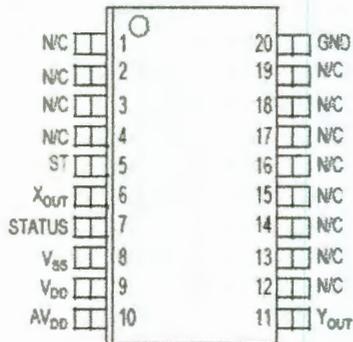
Freescale accelerometers include fault detection circuitry and a fault latch. The Status pin is an output from the fault latch, OR'd with self-test, and is set high whenever one (or more) of the following events occur:

- Supply voltage falls below the Low Voltage Detect (LVD) voltage threshold
- Clock oscillator falls below the clock monitor minimum frequency
- Parity of the EPROM bits becomes odd in number

The fault latch can be reset by a rising edge on the self-test input pin, unless one (or more) of the fault conditions continues to exist.

BASIC CONNECTIONS

Pinout Description



Pin No.	Pin Name	Description
1 thru 3	—	Leave unconnected.
4	—	No internal connection. Leave unconnected.
5	ST	Logic input pin used to initiate self-test.
6	X _{OUT}	Output voltage of the accelerometer. X Direction.
7	STATUS	Logic output pin to indicate fault.
8	V _{SS}	The power supply ground.
9	V _{DD}	The power supply input.
10	AV _{DD}	Power supply input (Analog).
11	Y _{OUT}	Output voltage of the accelerometer. Y Direction.
12 thru 16	—	Used for factory trim. Leave unconnected.
17 thru 19	—	No internal connection. Leave unconnected.
20	GND	Ground.

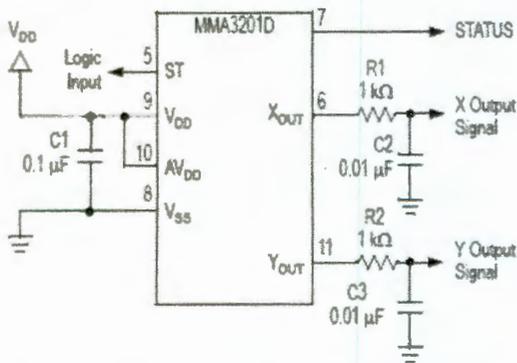


Figure 5. SOIC Accelerometer with Recommended Connection Diagram

PCB Layout

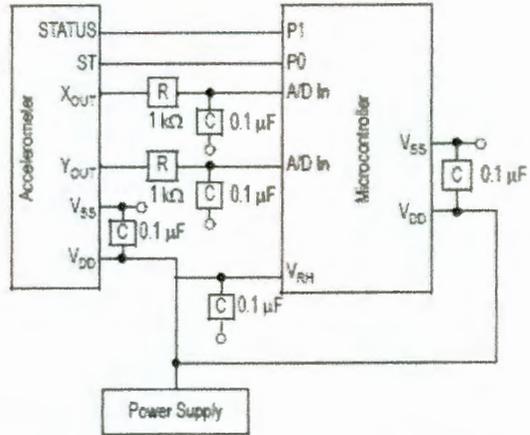
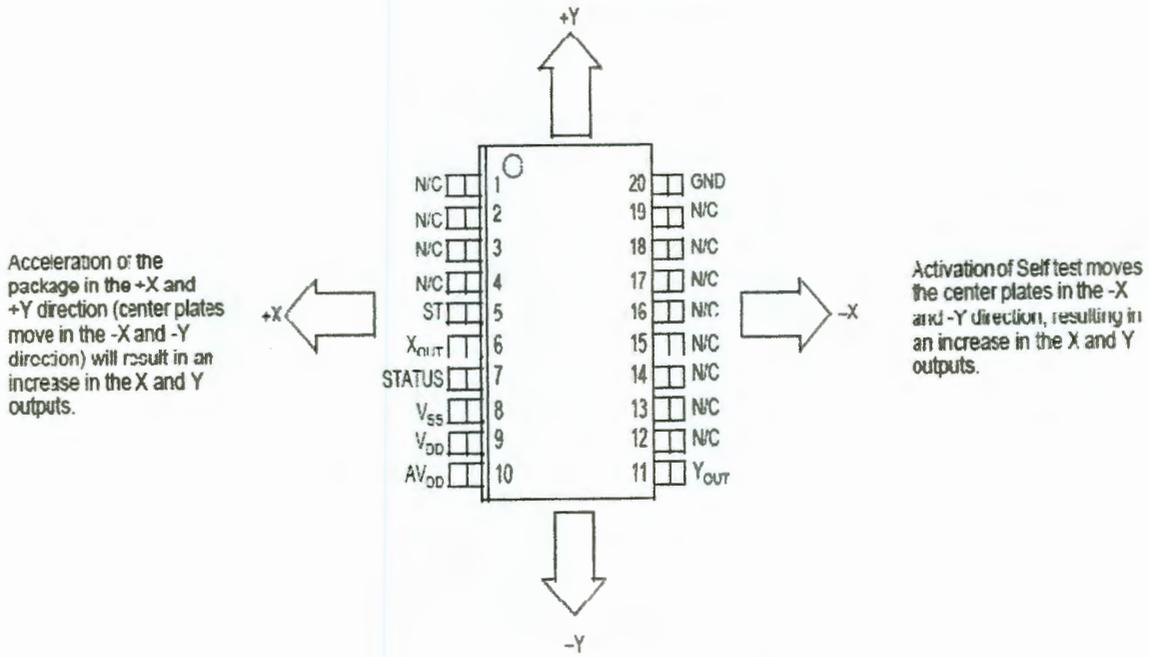


Figure 6. Recommended PCB Layout for Interfacing Accelerometer to Microcontroller

NOTES:

1. Use a 0.1 μF capacitor on V_{DD} to decouple the power source.
2. Physical coupling distance of the accelerometer to the microcontroller should be minimal.
3. Place a ground plane beneath the accelerometer to reduce noise, the ground plane should be attached to all of the open ended terminals shown in Figure 6.
4. Use an RC filter of 1 kΩ and 0.01 μF on the output of the accelerometer to minimize clock noise (from the switched capacitor filter circuit).
5. PCB layout of power and ground should not couple power supply noise.
6. Accelerometer and microcontroller should not be a high current path.
7. A/D sampling rate and any external power supply switching frequency should be selected such that they do not interfere with the internal accelerometer sampling frequency. This will prevent aliasing errors.

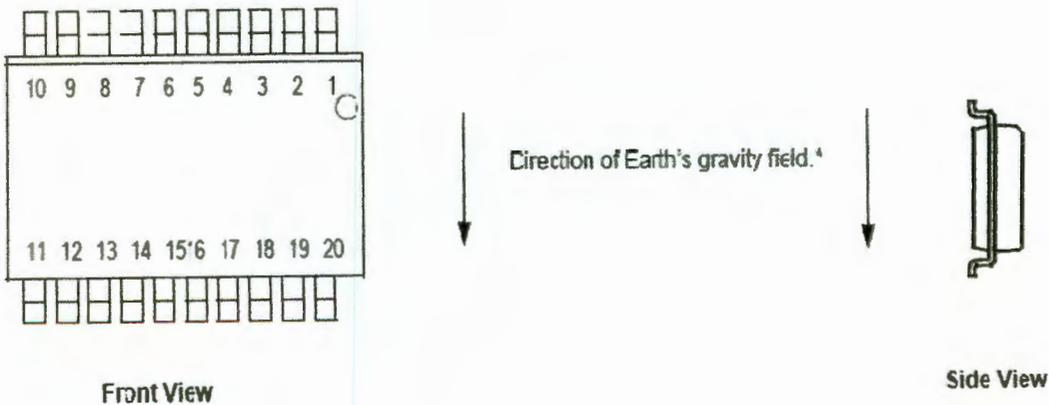
Dynamic Acceleration Sensing Direction



20-Pin SOIC Package
N/C pins are recommended to be left FLOATING

Top View

Static Acceleration Sensing Direction



* When positioned as shown, the Earth's gravity will result in a positive 1g output in the X channel.

Anexo B1. Programa en Matlab para graficar aceleración en función del tiempo.

```
% analisis de la vibracion

% carga de los datos .. el de menos vibracion PA22 en los tres ejes

Ax52=load('x38pa22.txt');
Ax52=Ax52-mean(Ax52);
Ay52=load('y38pa22.txt');
Ay52=Ay52-mean(Ay52);
Az52=load('z38pa22.txt');
Az52=Az52-mean(Az52);
Ar52=sqrt(Ax52(1:61000).^2+Ay52(1:61000).^2+Az52(1:61000).^2);
RmsAr52=norm(Ar52)/sqrt(length(Ar52));

% carga de los datos .. el de menos vibracion Pb33 en los tres ejes
Ax42=load('X38PB33.txt');
Ax42=Ax42-mean(Ax42);
Ay42=load('Y38PB33.txt');
Ay42=Ay42-mean(Ay42);
Az42=load('Z38PB33.txt');
Az42=Az42-mean(Az42);
Ar42=sqrt(Ax42(1:61000).^2+Ay42(1:61000).^2+Az42(1:61000).^2);
RmsAr42=norm(Ar42)/sqrt(length(Ar42));

% carga de los datos .. el de menos vibracion Pb22 en los tres ejes
Ax22=load('xpb22.txt');
Ax22=Ax22-mean(Ax22);
Ay22=load('ypb22.txt');
Ay22=Ay22-mean(Ay22);
Az22=load('zpb22.txt');
Az22=Az22-mean(Az22);
Ar22=sqrt(Ax22(1:61000).^2+Ay22(1:61000).^2+Az22(1:61000).^2);
RmsAr22=norm(Ar22)/sqrt(length(Ar22));

subplot(4,3,1)
plot(20*Ax52) % se multiplica por 20 esto nos da de g = (1/.05)v
xlabel('Muestras')
ylabel('Aceleración X(g)')
grid
AXIS([0 60000 -17 17])
title('Sin desgaste')
subplot(4,3,4)
plot(20*Ay52)
xlabel('Muestras')
ylabel('Aceleración Y(g)')
```

```

grid
AXIS([0 60000 -17 17])

subplot(4,3,7)
plot(20*Az52)
xlabel('Muestras')
ylabel('Aceleración Z(g)')
grid
AXIS([0 60000 -17 17])

subplot(4,3,10)
plot(20*Ar52)
xlabel('Muestras')
ylabel('Resultante(g) ')
grid
AXIS([0 60000 -17 17])

subplot(4,3,2)
plot(20*Ax42)
xlabel('Muestras')
ylabel('Aceleración X(g)')
grid
AXIS([0 60000 -17 17])
title('Desgaste intermedio')
subplot(4,3,5)
plot(20*Ay42)
xlabel('Muestras')
ylabel('Aceleración Y(g)')
grid
AXIS([0 60000 -17 17])

subplot(4,3,8)
plot(20*Az42)
xlabel('Muestras')
ylabel('Aceleración Z(g)')
grid
AXIS([0 60000 -17 17])

subplot(4,3,11)
plot(20*Ar42)
xlabel('Muestras')
ylabel('Resultante(g)')
grid
AXIS([0 60000 -17 17])

subplot(4,3,3)
plot(20*Ax22)
xlabel('Muestras')

```

```

ylabel('Acoustic pressure')
grid
AXIS([0 60000 -20 20])
title('Acoustic pressure')
subplot(4,3,6)
plot(20*Ay22)
xlabel('Time (s)')
ylabel('Acoustic pressure (Pa)')
grid
AXIS([0 60000 -20 20])

subplot(4,3,9)
plot(20*Az22)
xlabel('Time (s)')
ylabel('Acoustic pressure (Pa)')
grid
AXIS([0 60000 -20 20])

subplot(4,3,12)
plot(20*Ar22)
xlabel('Time (s)')
ylabel('Acoustic pressure (Pa)')
grid
AXIS([0 60000 -20 20])

```

Anexo B2. Programa en Matlab para cálculo de aceleración RMS, de cada inserto utilizado para un diámetro de la pieza de trabajo, D=38mm.

```
x=[];
%siguiente calculo 1
X1 = load('Z38PB62.txt');
X1 = norm(X1)/sqrt(length(X1))- mean (X1);
x=[x X1];
%siguiente calculo 2
X2 = load('Z38pa22.txt');
X2 = norm(X2)/sqrt(length(X2))- mean (X2);
x=[x X2];
%siguiente calculo 3
X3 = load('Z38pa42.txt');
X3 = norm(X3)/sqrt(length(X3))- mean (X3);
x=[x X3];
%siguiente calculo 4
X4 = load('Z38pa62.txt');
X4 = norm(X4)/sqrt(length(X4))- mean (X4);
x=[x X4];
%siguiente calculo 5
X5 = load('Z38pa40.txt');
X5 = norm(X5)/sqrt(length(X5))- mean (X5);
x=[x X5];
%siguiente calculo 6
X6 = load('Z38pb51.txt');
X6 = norm(X6)/sqrt(length(X6))- mean (X6);
x=[x X6];
%siguiente calculo 7
X7 = load('Z38pa52.txt');
X7 = norm(X7)/sqrt(length(X7))- mean (X7);
x=[x X7];
%siguiente calculo 8
X8 = load('Z38pa51.txt');
X8 = norm(X8)/sqrt(length(X8))- mean (X8);
x=[x X8];
%siguiente calculo 9
X9 = load('Z38pb33.txt');
X9 = norm(X9)/sqrt(length(X9))- mean (X9);
x=[x X9];
%siguiente calculo 10
X10 = load('Z38pb22.txt');
X10 = norm(X10)/sqrt(length(X10))- mean (X10);
x=[x X10];x'
plot(20*x,'o-')
axis([0 11 0 0.09])
hold on
```

Anexo B3. Programa en Matlab para cálculo de aceleración RMS, de cada inserto utilizado para un diámetro de la pieza de trabajo, D=34mm.

```
x=[];

%siguiente calculo 1
X1 = load('Z34PB62.txt');
X1 = (norm(X1)/sqrt(length(X1))- mean (X1))*9.81;
x=[x X1];
%siguiente calculo 2
X2 = load('Z34pa22.txt');
X2 = (norm(X2)/sqrt(length(X2))- mean (X2))*9.81;
x=[x X2];
%siguiente calculo 3
X3 = load('Z34pa42.txt');
X3 = (norm(X3)/sqrt(length(X3))- mean (X3))*9.81;
x=[x X3];
%siguiente calculo 4
X4 = load('Z34pa62.txt');
X4 = (norm(X4)/sqrt(length(X4))- mean (X4))*9.81;
x=[x X4];
%siguiente calculo 5
X5 = load('Z34pa40.txt');
X5 = (norm(X5)/sqrt(length(X5))- mean (X5))*9.81;
x=[x X5];
%siguiente calculo 6
X6 = load('Z34pb51.txt');
X6 = (norm(X6)/sqrt(length(X6))- mean (X6))*9.81;
x=[x X6];
%siguiente calculo 7
X7 = load('Z34pa52.txt');
X7 = (norm(X7)/sqrt(length(X7))- mean (X7))*9.81;
x=[x X7];
%siguiente calculo 8
% X8 = load('Z34pa51.txt');
% X8 = norm(X8)/sqrt(length(X8))- mean (X8);
% x=[x X8];
%siguiente calculo 9
X9 = load('Z34pb33.txt');
X9 = (norm(X9)/sqrt(length(X9))- mean (X9))*9.81;
x=[x X9];
%siguiente calculo 10
X10 = load('Z34pb22.txt');
X10 = (norm(X10)/sqrt(length(X10))- mean (X10))*9.81;
x=[x X10];
x'
plot(20*x, 'r o-')
axis([0 11 0 0.8])
hold on
```

Anexo B4. Programa en Matlab para cálculo de aceleración RMS, de cada inserto utilizado para un diámetro de la pieza de trabajo, D=30mm.

```
x=[];

%siguiente calculo 1
X1 = load('Z30PB62.txt');
X1 = (norm(X1)/sqrt(length(X1))- mean (X1))*9.81;
x=[x X1];
%siguiente calculo 2
X2 = load('Z30pa22.txt');
X2 = (norm(X2)/sqrt(length(X2))- mean (X2))*9.81;
x=[x X2];
%siguiente calculo 3
X3 = load('Z30pa42.txt');
X3 = (norm(X3)/sqrt(length(X3))- mean (X3))*9.81;
x=[x X3];
%siguiente calculo 4
X4 = load('Z30pa62.txt');
X4 = (norm(X4)/sqrt(length(X4))- mean (X4))*9.81;
x=[x X4];
%siguiente calculo 5
X5 = load('Z30pa40.txt');
X5 = (norm(X5)/sqrt(length(X5))- mean (X5))*9.81;
x=[x X5];
%siguiente calculo 6
X6 = load('Z30pb51.txt');
X6 = (norm(X6)/sqrt(length(X6))- mean (X6))*9.81;
x=[x X6];
%siguiente calculo 7
X7 = load('Z30pa52.txt');
X7 = (norm(X7)/sqrt(length(X7))- mean (X7))*9.81;
x=[x X7];
%siguiente calculo 8
% X8 = load('Z30pa51.txt');
% X8 = norm(X8)/sqrt(length(X8))- mean (X8);
% x=[x X8];
%siguiente calculo 9
X9 = load('Z30pb33.txt');
X9 = (norm(X9)/sqrt(length(X9))- mean (X9))*9.81;
x=[x X9];
%siguiente calculo 10
X10 = load('Z30pb22.txt');
X10 = (norm(X10)/sqrt(length(X10))- mean (X10))*9.81;
x=[x X10];
x'
plot(20*x, 'go-')
axis([0 11 0 0.8])
hold on
```

Anexo B5. Programa en Matlab para cálculo de las resultantes. XYZ para un diámetro de 38mm

```
XYZ1 = [];  
%siguiente calculo 1  
X1 = load('x38PB62.txt');X1 = X1-mean(X1);  
X1 = X1(1:69362);  
Y1 = load('Y38pb62.txt');Y1=Y1-mean(Y1);  
Z1 = load('Z38PB62.txt');Z1=Z1-mean(Z1);  
Z1 = Z1(1:69362);  
RXYZ1 = sqrt(X1.^2 + Y1.^2 + Z1.^2);  
RMSXYZ1 = (norm(RXYZ1)/sqrt(length(RXYZ1)))*9.81;  
XYZ1 = [XYZ1 RMSXYZ1];  
  
%siguiente calculo 2  
X2 = load('x38pa22.txt');X2 = X2-mean(X2);  
Y2 = load('Y38pa22.txt');Y2=Y2-mean(Y2);  
Y2 = Y2(1:72536);  
Z2 = load('Z38pa22.txt');Z2=Z2-mean(Z2);  
Z2 = Z2(1:72536);  
RXYZ2 = sqrt(X2.^2 + Y2.^2 + Z2.^2);  
RMSXYZ2 = (norm(RXYZ2)/sqrt(length(RXYZ2)))*9.81;  
XYZ1 = [XYZ1 RMSXYZ2];  
  
%siguiente calculo 3  
X3 = load('x38pa42.txt');X3 = X3-mean(X3);  
X3=X3(1:73282);  
Y3 = load('Y38pa42.txt');Y3=Y3-mean(Y3);  
Z3 = load('Z38pa42.txt');Z3=Z3-mean(Z3);  
Z3=Z3(1:73282);  
RXYZ3 = sqrt(X3.^2 + Y3.^2 + Z3.^2);  
RMSXYZ3 = (norm(RXYZ3)/sqrt(length(RXYZ3)))*9.81;  
XYZ1 = [XYZ1 RMSXYZ3];  
  
%siguiente calculo 4  
X4 = load('x38pa62.txt');X4=X4-mean(X4);  
Y4 = load('Y38pa62.txt');Y4=Y4-mean(Y4);  
Y4 = Y4(1:72196);  
Z4 = load('Z38pa62.txt');Z4=Z4-mean(Z4);  
Z4 = Z4(1:72196);  
RXYZ4 = sqrt(X4.^2 + Y4.^2 + Z4.^2);  
RMSXYZ4 = (norm(RXYZ4)/sqrt(length(RXYZ4)))*9.81;  
XYZ1 = [XYZ1 RMSXYZ4];  
  
%siguiente calculo 5  
X5 = load('x38pa40.txt');X5=X5-mean(X5);  
X5 = X5(1:71796);  
Y5 = load('Y38pa40.txt');Y5=Y5-mean(Y5);  
Z5 = load('Z38pa40.txt');Z5=Z5-mean(Z5);  
Z5 = Z5(1:71796);  
RXYZ5 = sqrt(X5.^2 + Y5.^2 + Z5.^2);  
RMSXYZ5 = (norm(RXYZ5)/sqrt(length(RXYZ5)))*9.81;  
XYZ1 = [XYZ1 RMSXYZ5];  
  
%siguiente calculo 6  
X6 = load('x38pb51.txt');X6=X6-mean(X6);  
X6 = X6(1:70758);  
Y6 = load('Y38pb51.txt');Y6=Y6-mean(Y6);  
Y6 = Y6(1:70758);  
Z6 = load('Z38pb51.txt');Z6=Z6-mean(Z6);  
RXYZ6 = sqrt(X6.^2 + Y6.^2 + Z6.^2);  
RMSXYZ6 = (norm(RXYZ6)/sqrt(length(RXYZ6)))*9.81;  
XYZ1 = [XYZ1 RMSXYZ6];  
  
%siguiente calculo 7  
X7 = load('x38pa52.txt');X7=X7-mean(X7);  
X7 = X7(1:66151);  
Y7 = load('Y38pa52.txt');Y7=Y7-mean(Y7);
```

```

Z7 = load('Z38pa52.txt');Z7=Z7-mean(Z7);
Z7 = Z7(1:66151);
RXYZ7 = sqrt(X7.^2 + Y7.^2 + Z7.^2);
RMSXYZ7 = (norm(RXYZ7)/sqrt(length(RXYZ7))*9.81);
XYZ1 = [XYZ1 RMSXYZ7];

%siguiente calculo 8
X8 = load('x38pa51.txt');X8=X8-mean(X8);
Y8 = load('Y38pa51.txt');Y8=Y8-mean(Y8);
Y8 = Y8(1:70683);
Z8 = load('Z38pa51.txt');Z8=Z8-mean(Z8);
Z8 = Z8(1:70683);
RXYZ8 = sqrt(X8.^2 + Y8.^2 + Z8.^2);
RMSXYZ8 = (norm(RXYZ8)/sqrt(length(RXYZ8))*9.81);
XYZ1 = [XYZ1 RMSXYZ8];

%siguiente calculo 9
X9 = load('x38pb33.txt');X9=X9-mean(X9);
Y9 = load('Y38pb33.txt');Y9=Y9-mean(Y9);
Y9 = Y9(1:71287);
Z9 = load('Z38pb33.txt');Z9=Z9-mean(Z9);
Z9 = Z9(1:71287);
RXYZ9 = sqrt(X9.^2 + Y9.^2 + Z9.^2);
RMSXYZ9 = (norm(RXYZ9)/sqrt(length(RXYZ9))*9.81);
XYZ1 = [XYZ1 RMSXYZ9];

%siguiente calculo 10
X10 = load('x38pb22.txt');X10=X10-mean(X10);
X10 = X10(1:59017);
Y10 = load('Y38pb22.txt');Y10=Y10-mean(Y10);
Z10 = load('Z38pb22.txt');Z10=Z10-mean(Z10);
Z10 = Z10(1:59017);
RXYZ10 = sqrt(X10.^2 + Y10.^2 + Z10.^2);
RMSXYZ10 = (norm(RXYZ10)/sqrt(length(RXYZ10))*9.81);
XYZ1 = [XYZ1 RMSXYZ10];

plot(XYZ1);
axis([0 11 0.5 2]);
hold on

```

Anexo B6. Programa en Matlab para cálculo de las resultantes. XYZ para un diámetro de 34mm

```
XYZ1 = [];  
  
%siguiente calculo 1  
X1 = load('X34PB62.txt');X1 = X1-mean(X1);  
X1 = X1(1:70360);  
Y1 = load('Y34pB62.txt');Y1=Y1-mean(Y1);  
Z1 = load('Z34PB62.txt');Z1=Z1-mean(Z1);  
Z1 = Z1(1:70360);  
RXYZ1 = sqrt(X1.^2 + Y1.^2 + Z1.^2);  
RMSXYZ1 = (norm(RXYZ1)/sqrt(length(RXYZ1))*9.81);  
XYZ1 = [XYZ1 RMSXYZ1];  
  
%siguiente calculo 2  
X2 = load('x34pa22.txt');X2 = X2-mean(X2);  
Y2 = load('Y34pa22.txt');Y2=Y2-mean(Y2);  
Y2 = Y2(1:71678);  
Z2 = load('Z34pa22.txt');Z2=Z2-mean(Z2);  
Z2 = Z2(1:71678);  
RXYZ2 = sqrt(X2.^2 + Y2.^2 + Z2.^2);  
RMSXYZ2 = (norm(RXYZ2)/sqrt(length(RXYZ2))*9.81);  
XYZ1 = [XYZ1 RMSXYZ2];  
  
%siguiente calculo 3  
X3 = load('x34pa42.txt');X3 = X3-mean(X3);  
X3=X3(1:71972);  
Y3 = load('Y34pa42.txt');Y3=Y3-mean(Y3);  
Z3 = load('Z34pa42.txt');Z3=Z3-mean(Z3);  
Z3=Z3(1:71972);  
RXYZ3 = sqrt(X3.^2 + Y3.^2 + Z3.^2);  
RMSXYZ3 = (norm(RXYZ3)/sqrt(length(RXYZ3))*9.81);  
XYZ1 = [XYZ1 RMSXYZ3];  
  
%siguiente calculo 4  
X4 = load('x34pa62.txt');X4=X4-mean(X4);  
X4 = X4(1:73610);  
Y4 = load('Y34pa62.txt');Y4=Y4-mean(Y4);  
Y4 = Y4(1:73610);  
Z4 = load('Z34pa62.txt');Z4=Z4-mean(Z4);  
RXYZ4 = sqrt(X4.^2 + Y4.^2 + Z4.^2);  
RMSXYZ4 = (norm(RXYZ4)/sqrt(length(RXYZ4))*9.81);  
XYZ1 = [XYZ1 RMSXYZ4];  
  
%siguiente calculo 5  
X5 = load('x34pa40.txt');X5=X5-mean(X5);  
X5 = X5(1:78554);  
Y5 = load('Y34pa40.txt');Y5=Y5-mean(Y5);  
Z5 = load('Z34pa40.txt');Z5=Z5-mean(Z5);  
Z5 = Z5(1:78554);  
RXYZ5 = sqrt(X5.^2 + Y5.^2 + Z5.^2);  
RMSXYZ5 = (norm(RXYZ5)/sqrt(length(RXYZ5))*9.81);  
XYZ1 = [XYZ1 RMSXYZ5];  
  
%siguiente calculo 6  
X6 = load('x34pb51.txt');X6=X6-mean(X6);  
X6 = X6(1:67341);  
Y6 = load('Y34pb51.txt');Y6=Y6-mean(Y6);  
Y6 = Y6(1:67341);  
Z6 = load('Z34pb51.txt');Z6=Z6-mean(Z6);  
RXYZ6 = sqrt(X6.^2 + Y6.^2 + Z6.^2);  
RMSXYZ6 = (norm(RXYZ6)/sqrt(length(RXYZ6))*9.81);  
XYZ1 = [XYZ1 RMSXYZ6];  
  
%siguiente calculo 7  
X7 = load('x34pa52.txt');X7=X7-mean(X7);  
X7 = X7(1:67052);
```

```

Y7 = load('Y34pa52.txt');Y7=Y7-mean(Y7);
Z7 = load('Z34pa52.txt');Z7=Z7-mean(Z7);
Z7 = Z7(1:67052);
RXYZ7 = sqrt(X7.^2 + Y7.^2 + Z7.^2);
RMSXYZ7 = (norm(RXYZ7)/sqrt(length(RXYZ7))*9.81);
XYZ1 = [XYZ1 RMSXYZ7];

%siguiente calculo 8
X8 = load('x34pa51.txt');X8=X8-mean(X8);
X8 = X8(1:68940);
Y8 = load('Y34pa51.txt');Y8=Y8-mean(Y8);
Y8 = Y8(1:68940);
Z8 = load('Z34pa51.txt');Z8=Z8-mean(Z8);
RXYZ8 = sqrt(X8.^2 + Y8.^2 + Z8.^2);
RMSXYZ8 = (norm(RXYZ8)/sqrt(length(RXYZ8))*9.81);
XYZ1 = [XYZ1 RMSXYZ8];

%siguiente calculo 9
X9 = load('x34pb33.txt');X9=X9-mean(X9);
X9 = X9(1:71010);
Y9 = load('Y34pb33.txt');Y9=Y9-mean(Y9);
Y9 = Y9(1:71010);
Z9 = load('Z34pb33.txt');Z9=Z9-mean(Z9);
RXYZ9 = sqrt(X9.^2 + Y9.^2 + Z9.^2);
RMSXYZ9 = (norm(RXYZ9)/sqrt(length(RXYZ9))*9.81);
XYZ1 = [XYZ1 RMSXYZ9];

%siguiente calculo 10
X10 = load('x34pb22.txt');X10=X10-mean(X10);
X10 = X10(1:58365);
Y10 = load('Y34pb22.txt');Y10=Y10-mean(Y10);
Z10 = load('Z34pb22.txt');Z10=Z10-mean(Z10);
Z10 = Z10(1:58365);
RXYZ10 = sqrt(X10.^2 + Y10.^2 + Z10.^2);
RMSXYZ10 = (norm(RXYZ10)/sqrt(length(RXYZ10))*9.81);
XYZ1 = [XYZ1 RMSXYZ10];

plot(XYZ1);
axis([0 11 0.5 1.8]);
hold on

```

Anexo B7. Programa en Matlab para cálculo de las resultantes. XYZ para un diámetro de 30 mm

```
XYZ1 = [];  
%siguiente calculo 1  
X1 = load('X30PB62.txt');X1 = X1-mean(X1);  
X1 = X1(1:73286);  
Y1 = load('Y30PB62.txt');Y1=Y1-mean(Y1);  
Z1 = load('Z30PB62.txt');Z1=Z1-mean(Z1);  
Z1 = Z1(1:73286);  
RXYZ1 = sqrt(X1.^2 + Y1.^2 + Z1.^2);  
RMSXYZ1 = (norm(RXYZ1)/sqrt(length(RXYZ1))*9.81);  
XYZ1 = [XYZ1 RMSXYZ1];  
  
%siguiente calculo 2  
X2 = load('x30pa22.txt');X2 = X2-mean(X2);  
X2 = X2(1:66385);  
Y2 = load('Y30pa22.txt');Y2=Y2-mean(Y2);  
Y2 = Y2(1:66385);  
Z2 = load('Z30pa22.txt');Z2=Z2-mean(Z2);  
RXYZ2 = sqrt(X2.^2 + Y2.^2 + Z2.^2);  
RMSXYZ2 = (norm(RXYZ2)/sqrt(length(RXYZ2))*9.81);  
XYZ1 = [XYZ1 RMSXYZ2];  
  
%siguiente calculo 3  
X3 = load('x30pa42.txt');X3 = X3-mean(X3);  
Y3 = load('Y30pa42.txt');Y3=Y3-mean(Y3);  
Y3=Y3(1:72289);  
Z3 = load('Z30pa42.txt');Z3=Z3-mean(Z3);  
Z3=Z3(1:72289);  
RXYZ3 = sqrt(X3.^2 + Y3.^2 + Z3.^2);  
RMSXYZ3 = (norm(RXYZ3)/sqrt(length(RXYZ3))*9.81);  
XYZ1 = [XYZ1 RMSXYZ3];  
  
%siguiente calculo 4  
X4 = load('x30pa62.txt');X4=X4-mean(X4);  
Y4 = load('Y30pa62.txt');Y4=Y4-mean(Y4);  
Y4 = Y4(1:72602);  
Z4 = load('Z30pa62.txt');Z4=Z4-mean(Z4);  
Z4 = Z4(1:72602);  
RXYZ4 = sqrt(X4.^2 + Y4.^2 + Z4.^2);  
RMSXYZ4 = (norm(RXYZ4)/sqrt(length(RXYZ4))*9.81);  
XYZ1 = [XYZ1 RMSXYZ4];  
  
%siguiente calculo 5  
X5 = load('x30pa40.txt');X5=X5-mean(X5);  
Y5 = load('Y30pa40.txt');Y5=Y5-mean(Y5);  
Y5 = Y5(1:73924);  
Z5 = load('Z30pa40.txt');Z5=Z5-mean(Z5);  
Z5 = Z5(1:73924);  
RXYZ5 = sqrt(X5.^2 + Y5.^2 + Z5.^2);  
RMSXYZ5 = (norm(RXYZ5)/sqrt(length(RXYZ5))*9.81);  
XYZ1 = [XYZ1 RMSXYZ5];  
  
%siguiente calculo 6  
X6 = load('x30pb51.txt');X6=X6-mean(X6);  
X6 = X6(1:66056);  
Y6 = load('Y30pb51.txt');Y6=Y6-mean(Y6);  
Z6 = load('Z30pb51.txt');Z6=Z6-mean(Z6);  
Z6 = Z6(1:66056);  
RXYZ6 = sqrt(X6.^2 + Y6.^2 + Z6.^2);  
RMSXYZ6 = (norm(RXYZ6)/sqrt(length(RXYZ6))*9.81);  
XYZ1 = [XYZ1 RMSXYZ6];  
  
%siguiente calculo 7  
X7 = load('x30pa52.txt');X7=X7-mean(X7);  
X7 = X7(1:72224);  
Y7 = load('Y30pa52.txt');Y7=Y7-mean(Y7);  
Y7 = Y7(1:72224);
```

```

Z7 = load('Z30pa52.txt');Z7=Z7-mean(Z7);
RXYZ7 = sqrt(X7.^2 + Y7.^2 + Z7.^2);
RMSXYZ7 = (norm(RXYZ7)/sqrt(length(RXYZ7))*9.81);
XYZ1 = [XYZ1 RMSXYZ7];

%siguiente calculo 8
X8 = load('x30pa51.txt');X8=X8-mean(X8);
X8 = X8(1:69202);
Y8 = load('Y30pa51.txt');Y8=Y8-mean(Y8);
Z8 = load('Z30pa51.txt');Z8=Z8-mean(Z8);
Z8 = Z8(1:69202);
RXYZ8 = sqrt(X8.^2 + Y8.^2 + Z8.^2);
RMSXYZ8 = (norm(RXYZ8)/sqrt(length(RXYZ8))*9.81);
XYZ1 = [XYZ1 RMSXYZ8];

%siguiente calculo 9
X9 = load('x30pb33.txt');X9=X9-mean(X9);
Y9 = load('Y30pb33.txt');Y9=Y9-mean(Y9);
Y9 = Y9(1:73983);
Z9 = load('Z30pb33.txt');Z9=Z9-mean(Z9);
Z9 = Z9(1:73983);
RXYZ9 = sqrt(X9.^2 + Y9.^2 + Z9.^2);
RMSXYZ9 = (norm(RXYZ9)/sqrt(length(RXYZ9))*9.81);
XYZ1 = [XYZ1 RMSXYZ9];

%siguiente calculo 10
X10 = load('x30pb22.txt');X10=X10-mean(X10);
X10 = X10(1:59017);
Y10 = load('Y30pb22.txt');Y10=Y10-mean(Y10);
Z10 = load('Z30pb22.txt');Z10=Z10-mean(Z10);
Z10 = Z10(1:59017);
RXYZ10 = sqrt(X10.^2 + Y10.^2 + Z10.^2);
RMSXYZ10 = (norm(RXYZ10)/sqrt(length(RXYZ10))*9.81);
XYZ1 = [XYZ1 RMSXYZ10];

plot(XYZ1);
axis([0 11 0.5 1.4]);
hold on

```

Anexo B8. Programa en Matlab para cálculo de las aceleraciones XYZ para un diámetro de 38mm.

```
%Cargando todas las señales de los ejes X,Y,Z para diametro de 38mm
clear all
AX38 = [];
AY38 = [];
AZ38 = [];
%siguiente calculo 1
X1 = load('X38PB62.txt');X1 = ((X1-mean(X1))*9.81)/.05;
X1 = X1(1:69362);
Y1 = load('Y38pB62.txt');Y1=((Y1-mean(Y1))*9.81)/.05;
Z1 = load('Z38PB62.txt');Z1=((Z1-mean(Z1))*9.81)/.05;
Z1 = Z1(1:69362);
RAX38 = X1;
RAY38 = Y1;
RAZ38 = Z1;
RMSAX38 = norm(RAX38)/sqrt(length(RAX38));
RMSAY38 = norm(RAY38)/sqrt(length(RAY38));
RMSAZ38 = norm(RAZ38)/sqrt(length(RAZ38));
AX38 = [AX38 RMSAX38];
AY38 = [AY38 RMSAY38];
AZ38 = [AZ38 RMSAZ38];

% %siguiente calculo 2
X2 = load('x38pa22.txt');X2 = ((X2-mean(X2))*9.81)/.05;
Y2 = load('Y38pa22.txt');Y2=((Y2-mean(Y2))*9.81)/.05;
Y2 = Y2(1:72536);
Z2 = load('Z38pa22.txt');Z2=((Z2-mean(Z2))*9.81)/.05;
Z2 = Z2(1:72536);
RAX382 = X2;
RAY382 = Y2;
RAZ382 = Z2;
RMSAX382 = norm(RAX382)/sqrt(length(RAX382));
RMSAY382 = norm(RAY382)/sqrt(length(RAY382));
RMSAZ382 = norm(RAZ382)/sqrt(length(RAZ382));
AX38 = [AX38 RMSAX382];
AY38 = [AY38 RMSAY382];
AZ38 = [AZ38 RMSAZ382];

% %siguiente calculo 3
X3 = load('x38pa42.txt');X3 = ((X3-mean(X3))*9.81)/.05;
X3=X3(1:73282);
Y3 = load('Y38pa42.txt');Y3=((Y3-mean(Y3))*9.81)/.05;
Z3 = load('Z38pa42.txt');Z3=((Z3-mean(Z3))*9.81)/.05;
Z3=Z3(1:73282);

RAX383 = X3;
RAY383 = Y3;
RAZ383 = Z3;
RMSAX383 = norm(RAX383)/sqrt(length(RAX383));
RMSAY383 = norm(RAY383)/sqrt(length(RAY383));
RMSAZ383 = norm(RAZ383)/sqrt(length(RAZ383));
AX38 = [AX38 RMSAX383];
AY38 = [AY38 RMSAY383];
AZ38 = [AZ38 RMSAZ383];

% %siguiente calculo 4
X4 = load('x38pa62.txt');X4 = ((X4-mean(X4))*9.81)/.05;
Y4 = load('Y38pa62.txt');Y4=((Y4-mean(Y4))*9.81)/.05;
Y4 = Y4(1:72196);
Z4 = load('Z38pa62.txt');Z4=((Z4-mean(Z4))*9.81)/.05;
Z4 = Z4(1:72196);

RAX384 = X4;
RAY384 = Y4;
RAZ384 = Z4;
RMSAX384 = norm(RAX384)/sqrt(length(RAX384));
RMSAY384 = norm(RAY384)/sqrt(length(RAY384));
```

```

RMSAZ384 = norm(RAZ384)/sqrt(length(RAZ384));
AX38 = [AX38 RMSAX384];
AY38 = [AY38 RMSAY384];
AZ38 = [AZ38 RMSAZ384];

% %siguiente calculo 5
X5 = load('x38pa40.txt');X5 = ((X5-mean(X5))*9.81)/.05;
X5 = X5(1:71796);
Y5 = load('Y38pa40.txt');Y5=((Y5-mean(Y5))*9.81)/.05;
Z5 = load('Z38pa40.txt');Z5=((Z5-mean(Z5))*9.81)/.05;
Z5 = Z5(1:71796);

RAX385 = X5;
RAY385 = Y5;
RAZ385 = Z5;
RMSAX385 = norm(RAX385)/sqrt(length(RAX385));
RMSAY385 = norm(RAY385)/sqrt(length(RAY385));
RMSAZ385 = norm(RAZ385)/sqrt(length(RAZ385));
AX38 = [AX38 RMSAX385];
AY38 = [AY38 RMSAY385];
AZ38 = [AZ38 RMSAZ385];

% %siguiente calculo 6
X6 = load('x38pb51.txt');X6 = ((X6-mean(X6))*9.81)/.05;
X6 = X6(1:70758);
Y6 = load('Y38pb51.txt');Y6=((Y6-mean(Y6))*9.81)/.05;
Y6 = Y6(1:70758);
Z6 = load('Z38pb51.txt');Z6=((Z6-mean(Z6))*9.81)/.05;

RAX386 = X6;
RAY386 = Y6;
RAZ386 = Z6;
RMSAX386 = norm(RAX386)/sqrt(length(RAX386));
RMSAY386 = norm(RAY386)/sqrt(length(RAY386));
RMSAZ386 = norm(RAZ386)/sqrt(length(RAZ386));
AX38 = [AX38 RMSAX386];
AY38 = [AY38 RMSAY386];
AZ38 = [AZ38 RMSAZ386];

% %siguiente calculo 7
X7 = load('x38pa52.txt');X7 = ((X7-mean(X7))*9.81)/.05;
X7 = X7(1:66151);
Y7 = load('Y38pa52.txt');Y7=((Y7-mean(Y7))*9.81)/.05;
Z7 = load('Z38pa52.txt');Z7=((Z7-mean(Z7))*9.81)/.05;
Z7 = Z7(1:66151);

RAX387 = X7;
RAY387 = Y7;
RAZ387 = Z7;
RMSAX387 = norm(RAX387)/sqrt(length(RAX387));
RMSAY387 = norm(RAY387)/sqrt(length(RAY387));
RMSAZ387 = norm(RAZ387)/sqrt(length(RAZ387));
AX38 = [AX38 RMSAX387];
AY38 = [AY38 RMSAY387];
AZ38 = [AZ38 RMSAZ387];

% %siguiente calculo 8
X8 = load('x38pa51.txt');X8 = ((X8-mean(X8))*9.81)/.05;
Y8 = load('Y38pa51.txt');Y8=((Y8-mean(Y8))*9.81)/.05;
Y8 = Y8(1:70683);
Z8 = load('Z38pa51.txt');Z8=((Z8-mean(Z8))*9.81)/.05;
Z8 = Z8(1:70683);

RAX388 = X8;
RAY388 = Y8;
RAZ388 = Z8;
RMSAX388 = norm(RAX388)/sqrt(length(RAX388));
RMSAY388 = norm(RAY388)/sqrt(length(RAY388));
RMSAZ388 = norm(RAZ388)/sqrt(length(RAZ388));
AX38 = [AX38 RMSAX388];
AY38 = [AY38 RMSAY388];
AZ38 = [AZ38 RMSAZ388];

```

```

% %siguiente calculo 9
X9 = load('x38pb33.txt');X9 = ((X9-mean(X9))*9.81)/.05;
Y9 = load('Y38pb33.txt');Y9=((Y9-mean(Y9))*9.81)/.05;
Y9 = Y9(1:71287);
Z9 = load('Z38pb33.txt');Z9=((Z9-mean(Z9))*9.81)/.05;
Z9 = Z9(1:71287);

RAX389 = X9;
RAY389 = Y9;
RAZ389 = Z9;
RMSAX389 = norm(RAX389)/sqrt(length(RAX389));
RMSAY389 = norm(RAY389)/sqrt(length(RAY389));
RMSAZ389 = norm(RAZ389)/sqrt(length(RAZ389));
AX38 = [AX38 RMSAX389];
AY38 = [AY38 RMSAY389];
AZ38 = [AZ38 RMSAZ389];

% %siguiente calculo 10
X10 = load('x38pb22.txt');X10 = ((X10-mean(X10))*9.81)/.05;
X10 = X10(1:59017);
Y10 = load('Y38pb22.txt');Y10=((Y10-mean(Y10))*9.81)/.05;
Z10 = load('Z38pb22.txt');Z10=((Z10-mean(Z10))*9.81)/.05;
Z10 = Z10(1:59017);

RAX380 = X10;
RAY380 = Y10;
RAZ380 = Z10;
RMSAX380 = norm(RAX380)/sqrt(length(RAX380));
RMSAY380 = norm(RAY380)/sqrt(length(RAY380));
RMSAZ380 = norm(RAZ380)/sqrt(length(RAZ380));
AX38 = [AX38 RMSAX380];
AY38 = [AY38 RMSAY380];
AZ38 = [AZ38 RMSAZ380];

plot(AX38,'bo-', 'linewidth',3);
axis([0 12 0 30]);
hold on
plot(AY38,'ks-', 'linewidth',2);
axis([0 12 0 30]);
hold on
plot(AZ38,'rv--', 'linewidth',2);
axis([0 12 0 30]);
hold on
grid on
xlabel('Inserto')
ylabel('Ax (m/s^2)')
title('Aceleraciones en ejes X,Y,Z')
legend('DX = 38','DY = 3','DZ = 38')

```

Anexo B9. Programa en Matlab para cálculo de las aceleraciones XYZ para un diámetro de 34mm.

```
%Cargando todas las señales del eje X para diametro de 38mm
clear all
AX34 = [];
AY34 = [];
AZ34 = [];
%siguiente calculo 1
X1 = load('x34PB62.txt');X1 = ((X1-mean(X1))*9.81)/.05;
X1 = X1(1:70360);
Y1 = load('Y34pB62.txt');Y1=((Y1-mean(Y1))*9.81)/.05;
Z1 = load('Z34PB62.txt');Z1=((Z1-mean(Z1))*9.81)/.05;
Z1 = Z1(1:70360);
RAX34 = X1;
RAY34 = Y1;
RAZ34 = Z1;
RMSAX34 = norm(RAX34)/sqrt(length(RAX34));
RMSAY34 = norm(RAY34)/sqrt(length(RAY34));
RMSAZ34 = norm(RAZ34)/sqrt(length(RAZ34));
AX34 = [AX34 RMSAX34];
AY34 = [AY34 RMSAY34];
AZ34 = [AZ34 RMSAZ34];

% %siguiente calculo 2
X2 = load('x34pa22.txt');X2 = ((X2-mean(X2))*9.81)/.05;
Y2 = load('Y34pa22.txt');Y2=((Y2-mean(Y2))*9.81)/.05;
Y2 = Y2(1:71678);
Z2 = load('Z34pa22.txt');Z2=((Z2-mean(Z2))*9.81)/.05;
Z2 = Z2(1:71678);
RAX342 = X2;
RAY342 = Y2;
RAZ342 = Z2;
RMSAX342 = norm(RAX342)/sqrt(length(RAX342));
RMSAY342 = norm(RAY342)/sqrt(length(RAY342));
RMSAZ342 = norm(RAZ342)/sqrt(length(RAZ342));
AX34 = [AX34 RMSAX342];
AY34 = [AY34 RMSAY342];
AZ34 = [AZ34 RMSAZ342];

% %siguiente calculo 3
X3 = load('x34pa42.txt');X3 = ((X3-mean(X3))*9.81)/.05;
X3=X3(1:71972);
Y3 = load('Y34pa42.txt');Y3=((Y3-mean(Y3))*9.81)/.05;
Z3 = load('Z34pa42.txt');Z3=((Z3-mean(Z3))*9.81)/.05;
Z3=Z3(1:71972);

RAX343 = X3;
RAY343 = Y3;
RAZ343 = Z3;
RMSAX343 = norm(RAX343)/sqrt(length(RAX343));
RMSAY343 = norm(RAY343)/sqrt(length(RAY343));
RMSAZ343 = norm(RAZ343)/sqrt(length(RAZ343));
AX34 = [AX34 RMSAX343];
AY34 = [AY34 RMSAY343];
AZ34 = [AZ34 RMSAZ343];

% %siguiente calculo 4
X4 = load('x34pa62.txt');X4 = ((X4-mean(X4))*9.81)/.05;
X4 = X4(1:73610);
Y4 = load('Y34pa62.txt');Y4=((Y4-mean(Y4))*9.81)/.05;
Y4 = Y4(1:73610);
Z4 = load('Z34pa62.txt');Z4=((Z4-mean(Z4))*9.81)/.05;

RAX344 = X4;
RAY344 = Y4;
RAZ344 = Z4;
RMSAX344 = norm(RAX344)/sqrt(length(RAX344));
RMSAY344 = norm(RAY344)/sqrt(length(RAY344));
RMSAZ344 = norm(RAZ344)/sqrt(length(RAZ344));
AX34 = [AX34 RMSAX344];
```

```

AY34 = [AY34 RMSAY344];
AZ34 = [AZ34 RMSAZ344];

% %siguiente calculo 5
X5 = load('x34pa40.txt');X5 = ((X5-mean(X5))*9.81)/.05;
X5 = X5(1:78554);
Y5 = load('Y34pa40.txt');Y5=((Y5-mean(Y5))*9.81)/.05;
Z5 = load('Z34pa40.txt');Z5=((Z5-mean(Z5))*9.81)/.05;
Z5 = Z5(1:78554);

RAX345 = X5;
RAY345 = Y5;
RAZ345 = Z5;
RMSAX345 = norm(RAX345)/sqrt(length(RAX345));
RMSAY345 = norm(RAY345)/sqrt(length(RAY345));
RMSAZ345 = norm(RAZ345)/sqrt(length(RAZ345));
AX34 = [AX34 RMSAX345];
AY34 = [AY34 RMSAY345];
AZ34 = [AZ34 RMSAZ345];

% %siguiente calculo 6
X6 = load('x34pb51.txt');X6 = ((X6-mean(X6))*9.81)/.05;
X6 = X6(1:67341);
Y6 = load('Y34pb51.txt');Y6=((Y6-mean(Y6))*9.81)/.05;
Y6 = Y6(1:67341);
Z6 = load('Z34pb51.txt');Z6=((Z6-mean(Z6))*9.81)/.05;

RAX346 = X6;
RAY346 = Y6;
RAZ346 = Z6;
RMSAX346 = norm(RAX346)/sqrt(length(RAX346));
RMSAY346 = norm(RAY346)/sqrt(length(RAY346));
RMSAZ346 = norm(RAZ346)/sqrt(length(RAZ346));
AX34 = [AX34 RMSAX346];
AY34 = [AY34 RMSAY346];
AZ34 = [AZ34 RMSAZ346];

% %siguiente calculo 7
X7 = load('x34pa52.txt');X7 = ((X7-mean(X7))*9.81)/.05;
X7 = X7(1:67052);
Y7 = load('Y34pa52.txt');Y7=((Y7-mean(Y7))*9.81)/.05;
Z7 = load('Z34pa52.txt');Z7=((Z7-mean(Z7))*9.81)/.05;
Z7 = Z7(1:67052);

RAX347 = X7;
RAY347 = Y7;
RAZ347 = Z7;
RMSAX347 = norm(RAX347)/sqrt(length(RAX347));
RMSAY347 = norm(RAY347)/sqrt(length(RAY347));
RMSAZ347 = norm(RAZ347)/sqrt(length(RAZ347));
AX34 = [AX34 RMSAX347];
AY34 = [AY34 RMSAY347];
AZ34 = [AZ34 RMSAZ347];

% %siguiente calculo 8
X8 = load('x34pa51.txt');X8 = ((X8-mean(X8))*9.81)/.05;
X8 = X8(1:68940);
Y8 = load('Y34pa51.txt');Y8=((Y8-mean(Y8))*9.81)/.05;
Y8 = Y8(1:68940);
Z8 = load('Z34pa51.txt');Z8=((Z8-mean(Z8))*9.81)/.05;

RAX348 = X8;
RAY348 = Y8;
RAZ348 = Z8;
RMSAX348 = norm(RAX348)/sqrt(length(RAX348));
RMSAY348 = norm(RAY348)/sqrt(length(RAY348));
RMSAZ348 = norm(RAZ348)/sqrt(length(RAZ348));
AX34 = [AX34 RMSAX348];
AY34 = [AY34 RMSAY348];
AZ34 = [AZ34 RMSAZ348];

% %siguiente calculo 9
X9 = load('x34pb33.txt');X9 = ((X9-mean(X9))*9.81)/.05;

```

```

X9 = X9(1:71010);
Y9 = load('Y34pb33.txt'); Y9 = ((Y9-mean(Y9))*9.81)/.05;
Y9 = Y9(1:71010);
Z9 = load('Z34pb33.txt'); Z9 = ((Z9-mean(Z9))*9.81)/.05;

RAX349 = X9;
RAY349 = Y9;
RAZ349 = Z9;
RMSAX349 = norm(RAX349)/sqrt(length(RAX349));
RMSAY349 = norm(RAY349)/sqrt(length(RAY349));
RMSAZ349 = norm(RAZ349)/sqrt(length(RAZ349));
AX34 = [AX34 RMSAX349];
AY34 = [AY34 RMSAY349];
AZ34 = [AZ34 RMSAZ349];

% siguiente calculo 10
X10 = load('x34pb22.txt'); X10 = ((X10-mean(X10))*9.81)/.05;
X10 = X10(1:58365);
Y10 = load('Y34pb22.txt'); Y10 = ((Y10-mean(Y10))*9.81)/.05;
Z10 = load('Z34pb22.txt'); Z10 = ((Z10-mean(Z10))*9.81)/.05;
Z10 = Z10(1:58365);

RAX340 = X10;
RAY340 = Y10;
RAZ340 = Z10;
RMSAX340 = norm(RAX340)/sqrt(length(RAX340));
RMSAY340 = norm(RAY340)/sqrt(length(RAY340));
RMSAZ340 = norm(RAZ340)/sqrt(length(RAZ340));
AX34 = [AX34 RMSAX340];
AY34 = [AY34 RMSAY340];
AZ34 = [AZ34 RMSAZ340];

plot(AX34,'bo-','linewidth',3);
axis([0 12 0 30]);
hold on
plot(AY34,'ks:','linewidth',2);
axis([0 12 0 30]);
hold on
plot(AZ34,'rv--','linewidth',2);
axis([0 12 0 30]);
hold on
grid on
xlabel('Inserto')
ylabel('Ax (m/s^2)')
title('Aceleraciones en ejes X,Y,Z')
legend('DX = 34', 'DY = 34', 'DZ = 34')

```

Anexo B10. Programa en Matlab para cálculo de las aceleraciones XYZ para un diámetro de 30mm.

```
%Cargando todas las señales del eje X para diametro de 38mm
clear all
AX30 = [];
AY30 = [];
AZ30 = [];
%siguiente calculo 1
X1 = load('X30PB62.txt');X1 = ((X1-mean(X1))*9.81)/.05;
X1 = X1(1:73286);
Y1 = load('Y30pB62.txt');Y1=((Y1-mean(Y1))*9.81)/.05;
Z1 = load('Z30PB62.txt');Z1=((Z1-mean(Z1))*9.81)/.05;
Z1 = Z1(1:73286);
RAX30 = X1;
RAY30 = Y1;
RAZ30 = Z1;
RMSAX30 = norm(RAX30)/sqrt(length(RAX30));
RMSAY30 = norm(RAY30)/sqrt(length(RAY30));
RMSAZ30 = norm(RAZ30)/sqrt(length(RAZ30));
AX30 = [AX30 RMSAX30];
AY30 = [AY30 RMSAY30];
AZ30 = [AZ30 RMSAZ30];

% %siguiente calculo 2
X2 = load('x30pa22.txt');X2 = ((X2-mean(X2))*9.81)/.05;
X2 = X2(1:66385);
Y2 = load('Y30pa22.txt');Y2=((Y2-mean(Y2))*9.81)/.05;
Y2 = Y2(1:66385);
Z2 = load('Z30pa22.txt');Z2=((Z2-mean(Z2))*9.81)/.05;

RAX302 = X2;
RAY302 = Y2;
RAZ302 = Z2;
RMSAX302 = norm(RAX302)/sqrt(length(RAX302));
RMSAY302 = norm(RAY302)/sqrt(length(RAY302));
RMSAZ302 = norm(RAZ302)/sqrt(length(RAZ302));
AX30 = [AX30 RMSAX302];
AY30 = [AY30 RMSAY302];
AZ30 = [AZ30 RMSAZ302];

% %siguiente calculo 3
X3 = load('x30pa42.txt');X3 = ((X3-mean(X3))*9.81)/.05;
Y3 = load('Y30pa42.txt');Y3=((Y3-mean(Y3))*9.81)/.05;
Y3=Y3(1:72289);
Z3 = load('Z30pa42.txt');Z3=((Z3-mean(Z3))*9.81)/.05;
Z3=Z3(1:72289);

RAX303 = X3;
RAY303 = Y3;
RAZ303 = Z3;
RMSAX303 = norm(RAX303)/sqrt(length(RAX303));
RMSAY303 = norm(RAY303)/sqrt(length(RAY303));
RMSAZ303 = norm(RAZ303)/sqrt(length(RAZ303));
AX30 = [AX30 RMSAX303];
AY30 = [AY30 RMSAY303];
AZ30 = [AZ30 RMSAZ303];

% %siguiente calculo 4
X4 = load('x30pa62.txt');X4 = ((X4-mean(X4))*9.81)/.05;
Y4 = load('Y30pa62.txt');Y4=((Y4-mean(Y4))*9.81)/.05;
Y4 = Y4(1:72602);
Z4 = load('Z30pa62.txt');Z4=((Z4-mean(Z4))*9.81)/.05;
Z4 = Z4(1:72602);
RAX304 = X4;
RAY304 = Y4;
RAZ304 = Z4;
RMSAX304 = norm(RAX304)/sqrt(length(RAX304));
RMSAY304 = norm(RAY304)/sqrt(length(RAY304));
RMSAZ304 = norm(RAZ304)/sqrt(length(RAZ304));
AX30 = [AX30 RMSAX304];
```

```

AY30 = [AY30 RMSAY304];
AZ30 = [AZ30 RMSAZ304];

% %siguiente calculo 5
X5 = load('x30pa40.txt');X5 = ((X5-mean(X5))*9.81)/.05;
Y5 = load('Y30pa40.txt');Y5=((Y5-mean(Y5))*9.81)/.05;
Y5 = Y5(1:73924);
Z5 = load('Z30pa40.txt');Z5=((Z5-mean(Z5))*9.81)/.05;
Z5 = Z5(1:73924);

RAX305 = X5;
RAY305 = Y5;
RAZ305 = Z5;
RMSAX305 = norm(RAX305)/sqrt(length(RAX305));
RMSAY305 = norm(RAY305)/sqrt(length(RAY305));
RMSAZ305 = norm(RAZ305)/sqrt(length(RAZ305));
AX30 = [AX30 RMSAX305];
AY30 = [AY30 RMSAY305];
AZ30 = [AZ30 RMSAZ305];

% %siguiente calculo 6
X6 = load('x30pb51.txt');X6 = ((X6-mean(X6))*9.81)/.05;
X6 = X6(1:66056);
Y6 = load('Y30pb51.txt');Y6=((Y6-mean(Y6))*9.81)/.05;
Z6 = load('Z30pb51.txt');Z6=((Z6-mean(Z6))*9.81)/.05;
Z6 = Z6(1:66056);
RAX306 = X6;
RAY306 = Y6;
RAZ306 = Z6;
RMSAX306 = norm(RAX306)/sqrt(length(RAX306));
RMSAY306 = norm(RAY306)/sqrt(length(RAY306));
RMSAZ306 = norm(RAZ306)/sqrt(length(RAZ306));
AX30 = [AX30 RMSAX306];
AY30 = [AY30 RMSAY306];
AZ30 = [AZ30 RMSAZ306];

% %siguiente calculo 7
X7 = load('x30pa52.txt');X7 = ((X7-mean(X7))*9.81)/.05;
X7 = X7(1:72224);
Y7 = load('Y30pa52.txt');Y7=((Y7-mean(Y7))*9.81)/.05;
Y7 = Y7(1:72224);
Z7 = load('Z30pa52.txt');Z7=((Z7-mean(Z7))*9.81)/.05;

RAX307 = X7;
RAY307 = Y7;
RAZ307 = Z7;
RMSAX307 = norm(RAX307)/sqrt(length(RAX307));
RMSAY307 = norm(RAY307)/sqrt(length(RAY307));
RMSAZ307 = norm(RAZ307)/sqrt(length(RAZ307));
AX30 = [AX30 RMSAX307];
AY30 = [AY30 RMSAY307];
AZ30 = [AZ30 RMSAZ307];

% %siguiente calculo 8
X8 = load('x30pa51.txt');X8 = ((X8-mean(X8))*9.81)/.05;
X8 = X8(1:69202);
Y8 = load('Y30pa51.txt');Y8=((Y8-mean(Y8))*9.81)/.05;
Z8 = load('Z30pa51.txt');Z8=((Z8-mean(Z8))*9.81)/.05;
Z8 = Z8(1:69202);
RAX308 = X8;
RAY308 = Y8;
RAZ308 = Z8;
RMSAX308 = norm(RAX308)/sqrt(length(RAX308));
RMSAY308 = norm(RAY308)/sqrt(length(RAY308));
RMSAZ308 = norm(RAZ308)/sqrt(length(RAZ308));
AX30 = [AX30 RMSAX308];
AY30 = [AY30 RMSAY308];
AZ30 = [AZ30 RMSAZ308];

% %siguiente calculo 9
X9 = load('x30pb33.txt');X9 = ((X9-mean(X9))*9.81)/.05;
Y9 = load('Y30pb33.txt');Y9=((Y9-mean(Y9))*9.81)/.05;

```

```

Y9 = Y9(1:73983);
Z9 = load('Z9.mat');Z9=((Z9-mean(Z9))*9.81)/.05;
Z9 = Z9(1:73983);
RAX309 = X9;
RAY309 = Y9;
RAZ309 = Z9;
RMSAX309 = norm(RAX309)/sqrt(length(RAX309));
RMSAY309 = norm(RAY309)/sqrt(length(RAY309));
RMSAZ309 = norm(RAZ309)/sqrt(length(RAZ309));
AX30 = [AX30 RMSAX309];
AY30 = [AY30 RMSAY309];
AZ30 = [AZ30 RMSAZ309];

%siguiente calculo 10
X10 = load('X10.mat');X10 = ((X10-mean(X10))*9.81)/.05;
X10 = X10(1:59017);
Y10 = load('Y10.mat');Y10=((Y10-mean(Y10))*9.81)/.05;
Z10 = load('Z10.mat');Z10=((Z10-mean(Z10))*9.81)/.05;
Z10 = Z10(1:59017);

RAX300 = X10;
RAY300 = Y10;
RAZ300 = Z10;
RMSAX300 = norm(RAX300)/sqrt(length(RAX300));
RMSAY300 = norm(RAY300)/sqrt(length(RAY300));
RMSAZ300 = norm(RAZ300)/sqrt(length(RAZ300));
AX30 = [AX30 RMSAX300];
AY30 = [AY30 RMSAY300];
AZ30 = [AZ30 RMSAZ300];

plot(AX30,'b','LineWidth',3);
axis([0 12 0 30]);
hold on;
plot(AY30,'r','LineWidth',2);
axis([0 12 0 30]);
hold on;
plot(AZ30,'g','LineWidth',2);
axis([0 12 0 30]);
hold on;
grid
xlabel('Time (s)')
ylabel('Amplitude (m)')
title('Time series of the earthquake (1992)')
legend('b', 'X', 'r', 'Y', 'g', 'Z')

```

Anexo B11. Programa en Matlab para cálculo de la FFT.

```
clear all

limx=800

%cargar datos 1
z1=load('PA51z30.txt');

Y1 = fft(z1);
n=length(Y1);
power1 = abs(Y1(1:floor(n/2))).^2;
nyquist = 1/2;
freq = (1:n/2)/(n/2)*nyquist;
period1=1./freq;

%cargar datos 2
z2=load('PB33Z30.txt');
Y2 = fft(z2);
n=length(Y2);
power2 = abs(Y2(1:floor(n/2))).^2;
nyquist = 1/2;
freq = (1:n/2)/(n/2)*nyquist;
period2=1./freq;

%cargar datos 3
z3=load('PB52Z30.txt');
Y3 = fft(z3);
n=length(Y3);
power3 = abs(Y3(1:floor(n/2))).^2;
nyquist = 1/2;
freq = (1:n/2)/(n/2)*nyquist;
period3=1./freq;

%cargar datos 4
z4=load('PB22Z30.txt');
Y4 = fft(z4);
n=length(Y4);
power4 = abs(Y4(1:floor(n/2))).^2;
nyquist = 1/2;
freq = (1:n/2)/(n/2)*nyquist;
period4=1./freq;

%cargar datos 5
z5=load('PB22Z34.txt');
Y5 = fft(z5);
n=length(Y5);
power5 = abs(Y5(1:floor(n/2))).^2;
nyquist = 1/2;
freq = (1:n/2)/(n/2)*nyquist;
period5=1./freq;

%cargar datos 6
z6=load('PB22Z38.txt');
Y6 = fft(z6);
n=length(Y6);
power6 = abs(Y6(1:floor(n/2))).^2;
nyquist = 1/2;
freq = (1:n/2)/(n/2)*nyquist;
period6=1./freq;

cla
L=25000;
%-----
x1=[]
for i=1:L
    x1=[x1 2.5];
end
plot3(x1,period1(1:L),power1(1:L))
%plot(power1)
```

```

hold
grid
-----
x2=[]
for i=1:L
    x2=[x2 2.0];
end
plot3(x2,period2(1:L),power2(1:L))
-----
x3=[]
for i=1:L
    x3=[x3 1.5];
end
plot3(x3,period3(1:L),power3(1:L))
-----
x4=[]
for i=1:L
    x4=[x4 1.5];
end
plot3(x4,period4(1:L),power4(1:L))
-----
x5=[]
for i=1:L
    x5=[x5 1.0];
end
plot3(x5,period5(1:L),power5(1:L))
-----
x6=[]
for i=1:L
    x6=[x6 0.5];
end
plot3(x6,period6(1:L),power6(1:L))

axis([0 3 0 limx 0 2.5e+5])
grid
xlabel('Time (s)')
ylabel('Temperature (K)')
zlabel('Space (m)')

```