



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería



Evaluación del estado de las herramientas de corte en el proceso de torneado a través del análisis del flujo magnético.

Opción de titulación
Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el título de
Ingeniero en Electromecánica

Presenta:
Geovanni Díaz Saldaña

Dirigido por:
Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos

Codirigido por:
M. en C. Israel Zamudio Ramírez.

Dirección General de Bibliotecas UAQ



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Campus San Juan del Río



Evaluación del estado de las herramientas de corte en el proceso de torneado a través del análisis del flujo magnético.

TESIS

Como parte de los requisitos para obtener el título de
INGENIERO ELECTROMECAÁNICO

Línea Terminal
MECATRÓNICA

Presenta:

Geovanni Díaz Saldaña

Dirigido por:

Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos.

SINODALES:

Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos
Presidente

Firma

M. en C. Israel Zamudio Ramírez
Secretario

Firma

Dr. Miguel Trejo Hernández
Vocal

Firma

Dr. Arturo Yosimar Jaen Cuellar
Suplente

Firma

San Juan del Río, Qro.

Resumen.

La industria de la manufactura es un sector muy importante dentro del desarrollo económico de las naciones, y dentro de ésta, el desgaste de las herramientas de corte es un factor de gran importancia debido a su impacto negativo directo en la calidad de las piezas fabricadas y los costos de producción. Durante las últimas décadas, se han desarrollado diversas técnicas de análisis para detectar y evaluar el desgaste en las herramientas dentro del proceso de maquinado considerando variables físicas como corriente eléctrica, vibraciones o fuerza, siendo la mayoría de ellas invasivas al proceso.

Por otro lado, el análisis de flujo magnético de dispersión en máquinas de inducción ha sido estudiado como herramienta para detectar y analizar fallas en las cadenas cinemáticas de la que forman parte, siendo una alternativa no invasiva y con resultados comparables a técnicas tradicionales como el análisis de corriente.

Con base a lo anterior, la presente tesis utiliza el análisis del flujo magnético del motor del husillo de un torno CNC para evaluar el nivel de desgaste en herramientas de corte, considerando la profundidad de corte como parámetro variable de maquinado, y utilizando una metodología para el análisis basada en tiempo-frecuencia. Los resultados muestran la efectividad de la propuesta mediante la validación en herramientas al variar la profundidad de corte y consiguiendo relacionar el flujo disperso con el nivel de desgaste presentado en las herramientas analizadas.

(Palabras clave: Desgaste en herramientas, flujo magnético de dispersión, motor de inducción, torno CNC, profundidad de corte).

Dedicatoria.

A mi familia.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Agradecimientos.

A mi familia por su apoyo incondicional durante la realización de mis estudios. A mis profesores, por la formación y guía recibida durante estos años. A mis amigos y compañeros, por las vivencias, aprendizajes y apoyo recibido a lo largo de la carrera. A mi asesor, el Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos, y mis sinodales, el M. en C. Israel Zamudio Ramírez, el Dr. Miguel Trejo Hernández y el Dr. Arturo Yosimar Jaen Cuellar, por su confianza, apoyo y guía durante el desarrollo de este proyecto.

Tabla de contenido

Resumen.....	i
Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos.....	iii
Índice de figuras.....	vi
Índice de Tablas.....	viii
Índice de Ecuaciones.....	ix
Capítulo 1.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Antecedentes.....	2
1.3 Objetivos.....	7
1.3.1 Objetivo general.....	7
1.3.2 Objetivos específicos.....	7
1.4 Descripción del problema.....	7
1.5 Justificación.....	8
1.6 Planteamiento general.....	9
Capítulo 2 : Fundamentación Teórica.....	11
2.1 Torno.....	11
2.1.1 Parámetros de torneado.....	14
2.2 Desgaste y falla de herramientas.....	16
2.3 Flujo magnético externo.....	20
2.4 Transformada de Fourier.....	24
2.5 Transformada Wavelet.....	26
2.6 Parámetros estadísticos.....	31
Capítulo 3 : Metodología.....	37
3.1 Materiales y equipos.....	38
3.1.1 Sensores de efecto Hall.....	38
3.1.2 Tarjeta de adquisición.....	39
3.1.3 Torno CNC.....	40
3.1.4 Material maquinado.....	41
3.1.5 Herramientas de corte.....	42
3.2 Métodos.....	44

3.2.1 Matriz de pruebas.	44
3.2.2 Procesamiento de las señales.	45
Capítulo 4 : Resultados.	48
4.1 Herramientas de corte.....	48
4.2 Pruebas con el torno CNC.	50
4.2.1 Programación de las rutinas de corte.	50
4.2.2 Barras maquinadas.....	51
4.3 Análisis de las señales obtenidas.	53
4.4 Análisis de profundidad de corte contra desgaste.....	59
4.5 Conclusiones.....	60
Apéndice I.	62
Referencias/Bibliografía.	63

Dirección General de Bibliotecas URQ

Índice de figuras.

Figura 1.1. Diagrama de planteamiento general.	10
Figura 2.1. Torno convencional y sus partes (Kalpakjian, 2008).	12
Figura 2.2. a) Ilustración de un torno CNC. b) Detalle de una torreta equipada con diversas herramientas (Kalpakjian, 2008).	13
Figura 2.3. Distintos tipos de desgaste en herramientas durante el cilindrado: (a) desgaste del flanco; (b) craterización; (c) filo de corte astillado; (d) agrietamiento térmico en la cara de ataque; (e) borde acumulado (BUE); (f) falla catastrófica (Kalpakjian, 2008).	20
Figura 2.4. Geometría simplificada de un motor (Romary, 2009).	22
Figura 2.5. Representación de los medios de atenuación (Romary, 2009).	22
Figura 2.6. Flujo disperso alrededor del motor y posiciones comunes para colocar sensores de bobina (Romary et al, 2013).	23
Figura 2.7. Ejemplo de señales cosenoidales a distintas escalas (Polikar, 1996).	28
Figura 2.8. Ilustración de la distribución tiempo-frecuencia con el uso de wavelets (Polikar, 1996).	29
Figura 2.9. Ilustración del algoritmo de codificación de sub-banda (Polikar, 1996).	30
Figura 3.1. Diagrama que ilustra la metodología seguida.	38
Figura 3.2. Sensores lineales de efecto Hall A1325 (Allegro MicroSystems, 2020).	39
Figura 3.3. Fotografía de la tarjeta diseñada para la captura de las señales de flujo.	39
Figura 3.4. Tarjeta de desarrollo MSP-EXP432P401R (Texas Instruments, 2020).	40
Figura 3.5. Torno CNC utilizado para la realización de las pruebas.	41
Figura 3.6. Fotografía del inserto "dañado" utilizado para las pruebas.	43
Figura 3.7. Tabla de información del inserto (travers.com.mx, 2020).	43
Figura 3.8. Tabla con información de los insertos (travers.com.mx, 2020).	44
Figura 3.9. Señal correspondiente al corte de 1.25mm de profundidad con el inserto "dañado" medida con el sensor 1 (flujo axial y radial).	46
Figura 4.1. Detalle del inserto "sano" posterior a las pruebas.	48
Figura 4.2. Detalle del inserto con desgaste "medio" (desgaste de punta). Puede observarse el nivel de desgaste debido al material acumulado (aluminio) señalado en la figura.	49
Figura 4.3 Detalle del inserto "dañado" (desgaste de punta y cara). Puede observarse el nivel de desgaste debido al material acumulado (aluminio) señalado en la figura.	49
Figura 4.4. Ejemplo de código para programar la rutina de corte en el torno CNC.	50
Figura 4.5. Ejemplo de trayectoria a seguir del código de la Figura 4.4.	50
Figura 4.6. Barras maquinadas a 0.25mm de profundidad. De izquierda a derecha: herramienta "sana", herramienta con desgaste "medio" y herramienta "dañada".	51

Figura 4.7. Barras maquinadas a 0.75mm de profundidad. De izquierda a derecha: herramienta "sana", herramienta con desgaste "medio" y herramienta "dañada".	52
Figura 4.8. Barras maquinadas a 1.25mm de profundidad. De izquierda a derecha: herramienta "sana", herramienta con desgaste "medio" y herramienta "dañada".	52
Figura 4.9. Barras maquinadas a 1.75mm de profundidad. De izquierda a derecha: herramienta "sana", herramienta con desgaste "medio" y herramienta "dañada".	53
Figura 4.10. Barras maquinadas a 2.25mm de profundidad. De izquierda a derecha: herramienta "sana", herramienta con desgaste "medio" y herramienta "dañada".	53
Figura 4.11. Señal acondicionada del sensor 1 (combinación de flujo axial y radial).	54
Figura 4.12. Señal acondicionada del sensor 2 (flujo radial).	54
Figura 4.13. Señal acondicionada del sensor 3 (flujo axial).	55
Figura 4.14. Señales correspondientes al sensor 1 (combinación de flujo axial y radial). Se pueden apreciar las perturbaciones por el corte de la herramienta en las zonas señaladas.	56
Figura 4.15. Señales correspondientes al sensor 2 (flujo radial). Se pueden apreciar las perturbaciones por el corte de la herramienta en las zonas señaladas.	56
Figura 4.16. Señales correspondientes al sensor 3 (flujo axial). Se pueden apreciar las perturbaciones por el corte de la herramienta en las zonas señaladas.	57
Figura 4.17. Gráfica de barras que muestra los niveles de energía para las distintas profundidades de corte para cada una de las herramientas con el sensor 1.	57
Figura 4.18. Gráfica de barras que muestra los niveles de energía para las distintas profundidades de corte para cada una de las herramientas con el sensor 2.	58
Figura 4.19. Gráfica de barras que muestra los niveles de energía para las distintas profundidades de corte para cada una de las herramientas con el sensor 3.	58

Índice de Tablas.

Tabla 2.1. Intervalos de valores de n para distintos materiales de herramientas (Kalpakjian, 2008).	17
Tabla 3.1. Propiedades del Aluminio 6061 (MakeltFrom.com, 2020).....	41
Tabla 3.2. Matriz de pruebas. Variación de profundidad de corte.	45

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Índice de Ecuaciones.

Ecuación_2.1.....	14
Ecuación_2.2.....	16
Ecuación_2.3.....	17
Ecuación_2.4.....	17
Ecuación_2.5.....	21
Ecuación_2.6.....	21
Ecuación_2.7.....	22
Ecuación_2.8.....	22
Ecuación_2.9.....	23
Ecuación_2.10.....	24
Ecuación_2.11.....	24
Ecuación_2.12.....	24
Ecuación_2.13.....	25
Ecuación_2.14.....	25
Ecuación_2.15.....	26
Ecuación_2.16.....	27
Ecuación_2.17.....	30
Ecuación_2.18.....	30
Ecuación_2.19.....	31
Ecuación_2.20.....	31
Ecuación_2.21.....	32
Ecuación_2.22.....	32
Ecuación_2.23.....	33
Ecuación_2.24.....	34
Ecuación_2.25.....	34
Ecuación_2.26.....	35
Ecuación_2.27.....	35
Ecuación_2.28.....	36
Ecuación_2.29.....	36
Ecuación_2.30.....	36

Capítulo 1

1.1 Introducción.

La industria manufacturera representa un sector de gran importancia para el desarrollo económico de las naciones (Haraguchi *et al*, 2017). Dentro de dicha industria, el estado de las herramientas en los distintos procesos de manufactura es esencial para la correcta producción de las partes ya que el desgaste que éstas presenten tiene un efecto directo en la calidad de las piezas fabricadas además de un impacto económico importante, aproximadamente 25% del costo de maquinado es destinado a herramientas y su falla es responsable de casi el 20% de tiempo de inactividad durante los procesos (Ghosh *et al*, 2018).

En los últimos años se han desarrollado diversas técnicas para evaluar el estado de las herramientas de corte durante el proceso de maquinado, esto con la finalidad de prevenir una disminución en la calidad de los maquinados y un incremento en los costos de producción por fallas en las herramientas y un mayor consumo energético debido a su mal estado. Dichas técnicas son de naturaleza variada, midiendo variables como corriente en los servomotores (Sevilla *et al*, 2011), fuerza o vibraciones (Luo *et al*, 2018) sobre las herramientas, así como la emisión acústica, e inclusive haciendo uso de sistemas de visión por computadora (Thakre *et al*, 2019) evaluando una o más variables (Trejo *et al*, 2010) (Jáuregui *et al*, 2018) y utilizando técnicas de procesamiento diversas que permitan generar modelos de evaluación confiables para la industria. La desventaja principal de dichas técnicas es que son de carácter invasivo y se ven pueden ver afectadas por variables del entorno de trabajo.

Por su parte, el análisis del flujo magnético disperso (*stray flux, sf*) en motores eléctricos ha sido utilizado para la identificación de fallas dentro de los mismos como fallas en rodamientos (Frosini *et al*, 2014), fallas en el rotor relacionadas con barras rotas (Park *et al*, 2018) (Ramirez-Nunez *et al*, 2018) o degradación del aislamiento (Zamudio-Ramirez *et al*, 2019), debido a que está relacionado directamente con el estado de la máquina, al igual que la corriente, y

permite la obtención de información de forma no invasiva, obteniendo resultados satisfactorios comparables a los obtenidos por métodos más tradicionales, como el análisis de la corriente eléctrica.

Es necesario tomar en cuenta que existen diversos parámetros a considerar dentro del proceso de maquinado y su relación tiene un efecto en la vida útil de las herramientas de corte. Dos de los parámetros más importantes dentro del proceso de torneado son la profundidad de corte, que es la distancia radial a la que se coloca la herramienta, y la velocidad de avance, definida como la distancia que la herramienta se desplaza horizontalmente por cada revolución de la pieza. Estos parámetros, junto con la velocidad de la pieza de trabajo y las propiedades de los materiales, tanto de la herramienta como de la pieza, influyen en la vida útil de la herramienta y el nivel de desgaste que ésta presente.

Debido a esto, el presente trabajo plantea el inicio del estudio de una relación entre fallos presentados en las herramientas de las máquinas CNC (Control Numérico Computarizado), a través de la medición del flujo magnético de dispersión en los motores de inducción de esta. Para esto, se considerará como parámetro variable la profundidad de corte, dejando el resto de los parámetros constantes, con la intención de observar el efecto de este parámetro de maquinado en el flujo magnético y establecer una relación con el desgaste de la herramienta. Esto enfocado al análisis de flujo en el motor del husillo de un torno CNC utilizando sensores de efecto Hall, siendo un trabajo pionero en este tipo de investigaciones con flujo magnético en la Universidad Autónoma de Querétaro y que pretende ampliar las áreas de aplicación del análisis de flujo disperso.

1.2 Antecedentes.

El monitoreo del estado de las herramientas de corte en los procesos de maquinado es de suma importancia debido a su impacto directo en la calidad de las partes fabricadas, costos y tiempos de producción. Si bien los programas de mantenimiento están pensados para disminuir el impacto que el desgaste o fractura de las herramientas pueda tener, la implementación de sistemas que permitan determinar el desgaste durante los procesos es esencial para la prevención. Para

ello se han estudiado diversos métodos de análisis para la identificación del desgaste, principalmente midiendo corriente en los motores, así como vibraciones en las herramientas, utilizando técnicas de procesamiento diversas como los métodos estadísticos o el análisis de tiempo-frecuencia.

Como muestra de esto, Sevilla *et al* (2011) expusieron una metodología que mediante mediciones de corriente en uno de los motores de una máquina de fresado CNC, el uso de la Transformada Wavelet Discreta (DWT, por sus siglas en inglés) y métodos estadísticos; permiten obtener un sistema de monitoreo de bajo costo que otorga buenos resultados en la detección de herramientas rotas, solamente si uno de los dientes de la herramienta presenta problemas. Además, realizan un análisis de las desventajas que se presentan para la detección de cada una de las variables utilizadas comúnmente para estos análisis.

Por su parte, Luo *et al* (2018) propusieron un modelo para la detección temprana de fallas mediante el análisis de vibraciones en un centro de maquinado CNC utilizando herramientas de *Deep Learning* o Aprendizaje Profundo. Este modelo permite el análisis cuando las condiciones del sistema cambian con el tiempo, lo cual presenta una ventaja sobre los métodos más tradicionales, y fue validado durante un periodo de 288 días en una fábrica automotriz. Si bien este modelo presenta una buena precisión para la detección de fallas, es necesaria una gran cantidad de información para el entrenamiento y prueba de las redes neuronales para validar los sistemas.

Igualmente, Trejo *et al* (2010) desarrollaron un sensor inteligente basado en FPGA con el cual analiza corriente y vibraciones para determinar el área desgastada en los insertos. Esta metodología consiguió una precisión tres veces mejor comparada con el análisis individual de las variables mencionadas, esto a partir del uso de funciones de ponderación que consideran los parámetros de maquinado.

De forma similar, Jáuregui *et al* (2018) propusieron un análisis de fuerza y vibraciones en los dominios de frecuencia y tiempo-frecuencia para estimar las condiciones de las herramientas en procesos de micro fresado de alta velocidad.

Para ello, los autores hacen uso de la transformada rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés) y la Transformada Wavelet Continua (CWT, por sus siglas en inglés) para analizar los datos obtenidos de pruebas realizadas con variaciones en los parámetros de corte. Los resultados reportados muestran variaciones en el contenido frecuencial con respecto a una herramienta sana, permitiendo la prevención de la fractura de las herramientas al combinar el análisis de variables.

Otra propuesta para la medición del desgaste es el uso de sistema de visión por computadora. Un ejemplo de ello es el trabajo de Thakre *et al* (2019), el cual desarrolla un sistema de visión para la medición directa del desgaste en insertos de carburo y muestra una propuesta novedosa para la calibración del sistema en línea. Considerando como parámetros el ancho, área y perímetro del desgaste de la herramienta, los autores fueron capaces de determinar el nivel de desgaste con un error promedio de 3% en comparación de un análisis utilizando un microscopio electrónico.

Por otro lado, el estudio del flujo magnético disperso o *stray flux* ha ganado relevancia en las últimas décadas al ofrecer un medio para la detección del estado de los motores de inducción y fallas en los mismos, como pueden ser barras rotas en el rotor, cortos circuitos en los bobinados, problemas con los rodamientos o desalineamientos al igual que degradación del aislamiento, todo esto debido a que el flujo, al igual que la corriente, se ven alterados cuando existe algún cambio en el estado de la máquina. Este interés en su estudio está relacionado a la posibilidad de medirlo con medios no invasivos, de bajo costo y fácil implementación, a diferencia de métodos más tradicionales.

Frosini *et al* (2014) muestran un breve resumen con algunos casos de estudio en los que el *sf* ha sido utilizado para detectar fallas como cortos circuitos en el bobinado del estator, barras rotas en el rotor, excentricidad en el rotor y fallas en rodamientos en diversas máquinas de inducción con aproximaciones diferentes. Posteriormente muestra una metodología para detección de fallas en rodamientos basada en la presencia de armónicos asociados a este tipo de fallas utilizando

métodos estadísticos y sensores personalizados en comparación a sensores comerciales.

Por su parte, Park *et al* (2018) señalaron que el uso del *sf* para la detección de barras rotas presenta una confiabilidad mayor al análisis de corriente debido a la influencia de los canales de ventilación en los motores, los cuales influyen a la detección de fallas inexistentes en mediciones de corriente debido a la asimetría magnética que producen. El trabajo de los autores mostró resultados favorables dentro y fuera del laboratorio. Otro punto importante que menciona es la no posibilidad de monitoreo remoto al medir el *sf*.

En otro estudio, realizado por Ramírez *et al* (2018), analizaron el flujo durante el transitorio de arranque para detectar fallas relacionadas a barras rotas y desalineamiento utilizando tres sensores en distintas posiciones. Los autores utilizaron técnicas de procesamiento avanzado como la transformada de Fourier de tiempo corto (STFT, por sus siglas en inglés), FFT y la DWT, obteniendo resultados favorables con esta técnica que, según los autores, puede ser empleada para complementar el diagnóstico a partir de otras variables físicas.

De manera similar, Zamudio *et al* (2019) propusieron una metodología y su aplicación en forma de un sensor inteligente para determinar el estado del aislamiento en los bobinados del motor a partir de la medición de variables con un sensor de bobina y un termopar. Para conseguir esto, los autores hicieron uso de la DWT, la Transformada Discreta Inversa de Wavelet (IDWT), la entropía de Wavelet (WE) y redes neuronales implementadas en FPGA (del inglés *field-programmable gate array*, matriz de puertas lógicas programable en campo), consiguiendo resultados favorables en el diagnóstico de dichas fallas.

Como se ha mencionado, el análisis de *sf* ha sido empleado principalmente para la detección de fallas en máquinas eléctricas, aprovechando la relación entre corriente y flujo, y los sistemas de detección del estado de las herramientas mediante el análisis de corriente se han efectuado principalmente a los servomotores de las máquinas, más no al motor del husillo de una máquina herramienta tipo torno, como el presente trabajo lo plantea. Considerando esto, es

importante mencionar también el estudio de sistemas de monitoreo de fallas en cadenas cinemáticas o el monitoreo de cargas con motores de inducción, esto debido a que dichos estudios nos permiten encontrar una relación entre la variación en el estado del sistema al cual está vinculado el motor y las variables eléctricas/magnéticas del mismo.

En este ámbito, Liu *et al* (2017) propone un sistema de monitoreo de carga en motores de inducción mediante el empleo de sensores de magnetorresistencia para analizar el flujo disperso. Mediante el análisis por espectrogramas de los datos obtenidos, los autores fueron capaces de encontrar patrones en la respuesta del sensor para identificar el comportamiento de la máquina al variar la carga y comparar la respuesta durante el arranque contra el estado estacionario de la máquina.

Por su parte, Rajendra *et al* (2013) presentan un método para monitoreo del estado de una transmisión/caja de cambios mediante el análisis de la señal de corriente del motor al cual está conectado. Los autores emplearon el análisis mediante FFT para monitorear y diagnosticar fallas en los engranes y los rodamientos con distintas condiciones de carga obteniendo resultados favorables.

Los trabajos mencionados muestran los distintos acercamientos que se tienen para la detección de fallas en herramientas de corte, aplicando monitoreo de distintas variables, las cuales pueden llegar a ser invasivas o verse afectadas por las condiciones del maquinado. Igualmente, se mencionan los usos que se le han dado al análisis de flujo magnético disperso para detectar fallas en máquinas eléctricas, siendo esta la única aplicación para dicho análisis. De forma similar se mencionan algunos ejemplos de medición de variables para detectar modificaciones dentro de cadenas cinemáticas por medio de corriente y flujo, con lo que se puede suponer una relación entre ambos métodos. Todo esto permite dar paso al presente trabajo, que busca generar una nueva forma de identificar el nivel de desgaste mediante el análisis del flujo magnético del motor del husillo de un torno CNC considerando como parámetro variable la profundidad de corte, ampliando el campo de aplicación para esta variable.

1.3 Objetivos.

1.3.1 Objetivo general.

Determinar el estado de desgaste en herramientas de corte mediante el análisis del flujo magnético del motor del husillo en un torno CNC y explorar una nueva técnica de análisis, la cual sea insensible a la variación de la profundidad de corte durante el maquinado.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Diseñar una matriz de pruebas con variación de profundidad de corte, como parámetro de interés, para analizar el comportamiento del fenómeno bajo estudio ante tal caso.
- Realizar pruebas con torno CNC, siguiendo los parámetros definidos en la matriz de pruebas, para la evaluación del estado de las herramientas de corte utilizando sensores de efecto Hall como elemento de medición.
- Analizar los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en herramientas y maquinados con el torno de control numérico mediante el uso de técnicas avanzadas de procesamiento de señales como la DWT.
- Generar indicadores, a partir del análisis de las señales adquiridas, que proporcionen información relevante acerca del estado de las herramientas y la profundidad de corte para la identificación del nivel de desgaste.

1.4 Descripción del problema.

El desgaste de las herramientas de corte dentro de los procesos de maquinado tiene un impacto considerable en la fabricación de piezas dentro de las industrias: desde la fabricación de piezas con dimensiones incorrectas o acabados irregulares hasta un 20% del tiempo de paro de producción, aumentando los costos de esta. Existen varios parámetros dentro del proceso de torneado que definen la forma en que se realizará el maquinado y tienen un efecto directo sobre el estado de la herramienta, dichos parámetros pueden influir en el nivel y la detección del desgaste.

A lo largo de los años se han desarrollado diversas metodologías con la finalidad de evaluar el estado de las herramientas con precisión y así poder mejorar los procesos de manufactura y reducir la probabilidad de fallas o errores durante dichos procesos. En algunos de estos casos, las técnicas desarrolladas utilizan sensores invasivos o requieren condiciones controladas para una correcta evaluación, en otros casos, los métodos pueden verse afectados por elementos utilizados dentro del proceso de corte, como el uso de refrigerantes y sistemas de visión artificial.

Por otro lado, pocas aplicaciones se han desarrollado que empleen la medición de sf , fuera de la detección de fallas en máquina eléctrica, pese a ser una opción de menor costo y con gran potencial, que puede proporcionar información relevante de la cadena cinemática. Otro de los problemas a resolver con ello es el buscar una opción poco invasiva y eficiente en el diagnóstico, en este caso, se probará con el flujo magnético.

1.5 Justificación.

Con base en lo expuesto anteriormente, el presente trabajo busca una alternativa a los métodos tradicionales para la detección del desgaste en herramientas de corte mediante el análisis del sf en el motor del husillo de un torno CNC y su eficacia ante la variación de la profundidad de corte. Esto representaría una ventaja contra otros métodos debido a la naturaleza del fenómeno a analizar, ya que puede ser medido con elementos no invasivos, y, al ser medido directamente en el motor, el efecto de ciertos elementos dentro del proceso podría tener un impacto menor. Además, la utilización de diversas técnicas de procesamiento puede permitir tener una mayor precisión en la identificación del desgaste, lo que permitiría a las industrias reducir el impacto económico que representan las fallas de las herramientas. Además de buscar que sea insensible a la variación de la profundidad de corte, permitiendo estudiar su efecto sobre el sf y la identificación del nivel de desgaste.

Igualmente, se busca propulsar el estudio del *sf* para su implementación en nuevos campos, lo que permitiría un desarrollo científico positivo que favorecería a diversas industrias.

1.6 Planteamiento general.

En la Figura 1.1 se muestra el diagrama del planteamiento general para el presente trabajo:

1. Documentación de temas relacionados: Se llevará a cabo una investigación sobre las temáticas de interés: desgaste de herramientas y métodos de detección de desgaste, flujo magnético externo y las aplicaciones que se le ha dado.
2. Diseño e implementación del sistema de adquisición de datos: Se diseñará e implementará el sistema para la adquisición de datos, el cual consistirá en sensores lineales de efecto Hall modelo A1325 de Allegro Microsystems, una etapa de acondicionamiento para la adquisición mediante el uso de una tarjeta de desarrollo modelo MSP-EXP432P401R de Texas Instruments.
3. Diseño de la matriz de pruebas: Se seleccionarán los materiales a utilizar en las pruebas y las profundidades de corte, y se diseñará la matriz para las mismas.
4. Realización de pruebas: se acondicionarán las herramientas con niveles de desgaste distinto y se realizarán una serie de desbastes en un torno CNC para poder medir el flujo magnético externo en el motor del husillo de la máquina herramienta.
5. Análisis de los datos obtenidos: Se aplicarán técnicas de procesamiento avanzado, como la DWT, a las señales adquiridas para obtener indicadores que muestren una relación entre el nivel de desgaste de la herramienta, la profundidad de corte en el maquinado y las variaciones de *sf*.

6. Documentación de los resultados obtenidos: Finalmente, se presentarán los resultados obtenidos de los análisis y las pruebas realizadas.

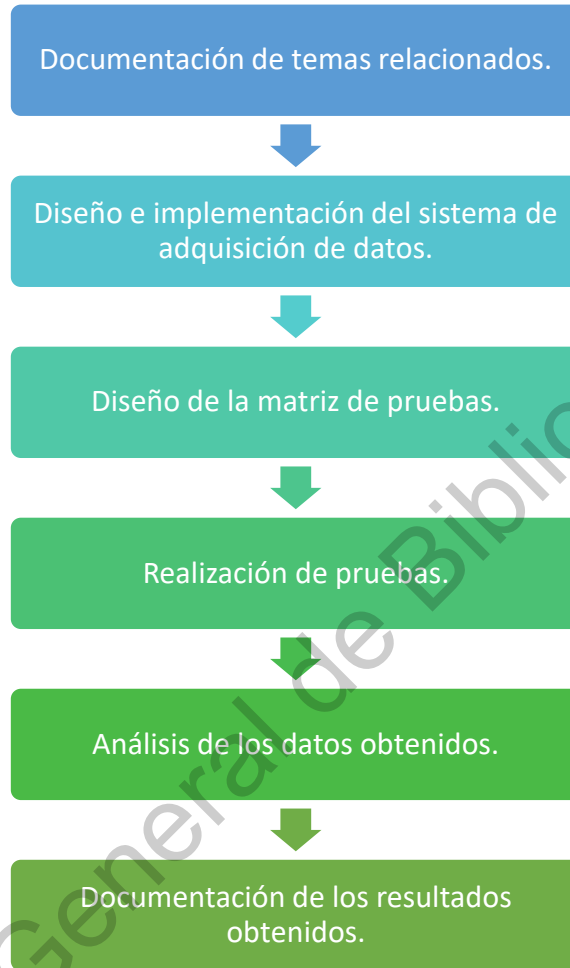


Figura 1.1. Diagrama de planteamiento general.

Capítulo 2 : Fundamentación Teórica.

2.1 Torno.

El torneado es un proceso de maquinado en el cual la pieza de trabajo gira mientras se está maquinando. Este proceso suele llevarse a cabo en un torno o una máquina similar. Los tornos son de las máquinas herramienta más antiguas, surgiendo los primeros para trabajar madera alrededor del año 1000 A.C.; por su parte, los primeros tornos para trabajar metales se construyeron a finales del siglo XVIII (Kalpakjian, 2008).

Estas máquinas se componen esencialmente de las siguientes partes, como se ilustra en la Figura 2.1:

- Bancada. Elemento que soporta los componentes principales del torno, tiene una gran masa y rígida, generalmente son de hierro gris o fundido nodular. En la parte superior cuenta con dos guías o correderas para el desplazamiento de los carros.
- Carro. Elemento que se desliza sobre las guías y consta de corredera transversal, portaherramientas y tablero. Sobre el portaherramientas se monta la herramienta de corte, con algún apoyo que permite que gire para ajustar su posición. La corredera transversal se mueve radialmente hacia adentro y afuera, permitiendo la movilidad de la herramienta de forma radial. El tablero se compone de los mecanismos para el movimiento manual y automático del carro y la corredera transversal gracias al tornillo de avance.
- Cabezal. Parte que se fija a la bancada y, mediante motores, poleas y bandas, suministra energía al husillo a distintas velocidades, las cuales se pueden ajustar mediante controles manuales o eléctricos. La mayoría cuenta con juego de engranes o accionamientos para proporcionar al husillo de una gama variable de velocidades.

- Carro de contrapunto. Elemento que se desliza por las guías y es capaz de sujetarse en cualquier posición con la finalidad de soportar el extremo de la pieza de trabajo. Cuenta con un centro que puede fijarse o quedar libre para girar con la pieza a maquinar. Igualmente, tiene una boquilla en la que se pueden montar brocas o rimas para taladrar la pieza.
- Barra de avance y tornillo guía. Parte que gira durante el proceso de torneado y proporciona movimiento al carro.

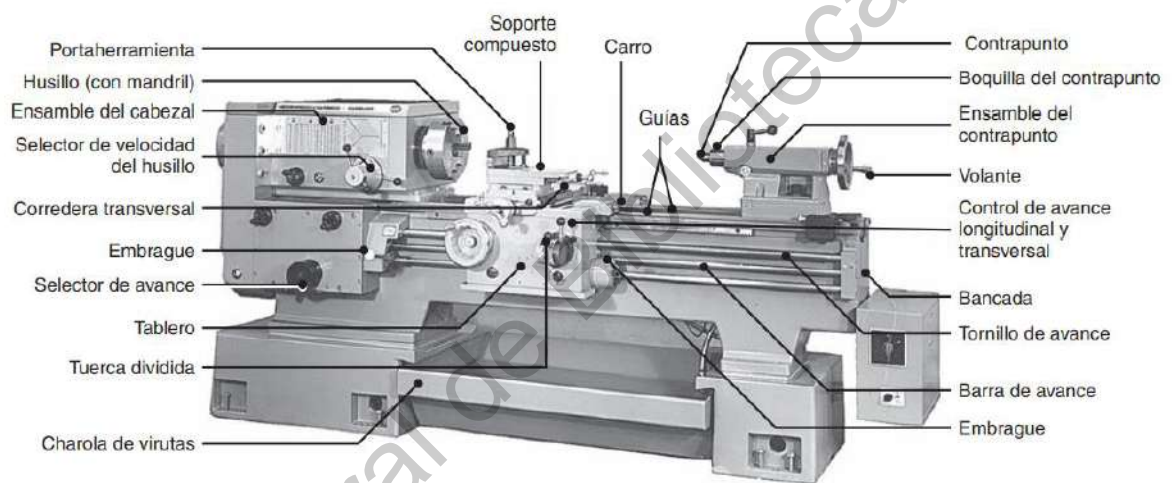


Figura 2.1. Torno convencional y sus partes (Kalpakjian, 2008).

Existen distintos tipos de tornos:

- Tornos de banco. Se colocan sobre una mesa o banco de trabajo. Son de baja potencia, generalmente son de avance manual y se utilizan para maquinar pequeñas piezas.
- Tornos de propósito especial. Se utilizan para aplicaciones con piezas de trabajo de hasta 1.7m de diámetro y 8m de longitud, teniendo capacidad de hasta 450kW.
- Tornos copiadores. Cuentan con aditamentos especiales para realizar varios contornos, permitiendo a la herramienta seguir una trayectoria a partir de una plantilla. Estos tornos han sido

reemplazados por los de control numérico y los centros de maquinado.

- Tornos automáticos. Permiten realizar de forma automática una operación de maquinado a partir de una secuencia prescrita.
- Máquinas automáticas para barras. Llamadas también máquinas roscadoras automáticas, están diseñadas para el maquinado a altas velocidades de tornillos y partes roscadas.
- Tornos de torreta (revólver). Cuentan con una torreta que permite montar varias herramientas para realizar distintas operaciones sobre una pieza mediante el giro de la torreta.
- Tornos controlados por computadora. En este tipo de tornos, el movimiento y control de la máquina herramienta y sus componentes se realiza mediante controles numéricos computarizados (CNC). Son diseñados para operar con mayor velocidad y cuentan con mayor potencia. Están equipados con cambiadores de herramientas automáticos y permiten una repetitividad confiable y precisión adecuada. Ejemplo de este tipo se muestra en la Figura 2.2.

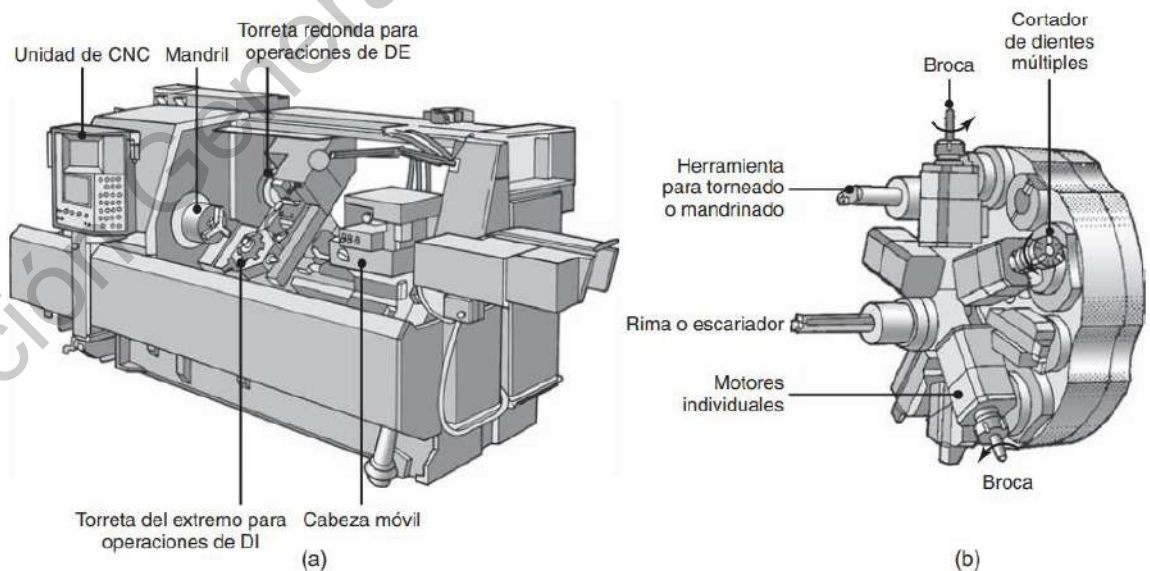


Figura 2.2. a) Ilustración de un torno CNC. b) Detalle de una torreta equipada con diversas herramientas (Kalpakjian, 2008).

2.1.1 Parámetros de torneado.

Existen diversos parámetros que afectan el proceso de torneado, los cuales se enlistan a continuación (Deingenierias.com, 2020):

- Velocidad de corte. Es la velocidad con la que la pieza de trabajo es cortada por la herramienta de corte, es la velocidad con la que la cuchilla recorre la pieza y por lo tanto se trata de una velocidad lineal que depende de la velocidad de giro de la pieza.

La alta velocidad permite realizar operaciones en menor tiempo, sin embargo, el filo de la herramienta sufrirá un desgaste más rápido.

- Efectos de velocidad de corte excesiva:
 - Desgaste rápido del filo de la herramienta.
 - Posible deformación plástica de la herramienta, lo cual puede afectar las tolerancias de la pieza.
 - Pueden producirse acabados deficientes.
- Efectos de velocidad de corte muy baja:
 - Retrasa el tiempo de producción, lo que eleva el costo total.
 - Dificulta la evacuación de viruta.
 - Se puede acumular material en la herramienta.

La ecuación 2.1 muestra la forma de calcular la velocidad de corte durante un cilindrado, donde V_c es la velocidad de corte en m/min , D es el diámetro inicial de la pieza en milímetros y N es la velocidad angular de la pieza en revoluciones por minuto.

$$V_c = \frac{\pi DN}{1000} \quad 2.1$$

- Velocidad de avance. Es la velocidad con que avanza la herramienta de corte y se indica en mm/min . Se entiende que la herramienta de corte avanza cierta distancia por cada vuelta que da la pieza mecanizada, esto se conoce como avance por revolución; cada

herramienta de corte puede trabajar adecuadamente dentro de un rango de velocidad de avance por rotación. Este parámetro se determina a partir de las dimensiones de la pieza, el tipo de operación y el material de la pieza y de la herramienta, y es decisivo para la formación de viruta, afecta al consumo de potencia y contribuye a la tensión mecánica y térmica dentro del proceso.

- Efectos de la velocidad de corte elevada.
 - Buen control de viruta.
 - Menor tiempo de corte.
 - Menor desgaste de la herramienta.
 - Riesgo más alto de rotura de la herramienta.
 - Elevada rugosidad superficial del maquinado.
- Efectos de la velocidad de avance baja.
 - Viruta más larga.
 - Mejora la calidad del maquinado.
 - Desgaste acelerado de la herramienta.
 - Mayor duración del tiempo de maquinado.
 - Mayor costo de producción.
- Velocidad de rotación de la pieza. Hace referencia a la velocidad con la que gira la pieza mecanizada que está directamente unida a la velocidad del cabezal del torno, sus unidades de medida son los rpm o revoluciones por minuto.
- Profundidad de corte. Se considera la distancia radial entre la superficie de la pieza mecanizada y un punto límite por donde pasa la herramienta de corte en una pasada y su dimensión depende del tipo de material y la potencia del torno. Determina la cantidad de material removido, la forma de la viruta, tiempo de mecanizado, etc.
- Fuerza de corte. Este parámetro depende del avance, la profundidad de corte, la velocidad de corte, la dureza de la pieza y es un factor que permite calcular la potencia de corte necesaria que requiere cualquier operación de mecanizado en torno.

- Potencia de corte. La potencia de corte necesaria para efectuar un determinado mecanizado se puede determinar a partir del valor del volumen de viruta arrancada, la fuerza específica de corte y del rendimiento que posee la máquina. Su unidad es expresada en kilovatios (kW).

2.2 Desgaste y falla de herramientas.

Las herramientas de corte se ven sometidas a esfuerzos localizados en la punta de estas, altas temperaturas en la cara de ataque, deslizamiento de la viruta a lo largo de la cara de ataque y deslizamiento de la herramienta a lo largo de la superficie de la pieza. Estas condiciones generan desgaste en la herramienta, el cual afecta su vida útil, la calidad de los acabados y la precisión de las dimensiones de las partes producidas (Kalpakjian, 2008).

El desgaste en la herramienta se presenta gradualmente dependiendo del material que esté hecha y el material que se trabaje, su geometría, los parámetros del proceso de maquinado, los fluidos de corte utilizados y las características de la máquina herramienta.

F.W. Taylor (Kalpakjian, 2008) realizó un estudio sobre el maquinado de aceros en la década de 1890, estableció la siguiente relación (ecuación 2.2):

$$VT^n = C \quad 2.2$$

Donde V es la velocidad de corte, T el tiempo en minutos que se requiere para desarrollar cierta profundidad de desgaste en el flanco, n un exponente que depende de los materiales de la herramienta y las piezas de trabajo y las condiciones de corte, y C una constante. Generalmente, n depende del material de la herramienta, como se muestra en la Tabla 2.1, y C del material de la pieza de trabajo.

Tabla 2.1. Intervalos de valores de n para distintos materiales de herramientas (Kalpakjian, 2008).

Intervalos de valores de n para la ecuación de Taylor en diversos materiales para herramientas	
Aceros de alta velocidad	0.08-0.2
Aleaciones fundidas	0.1-0.15
Carburos	0.2-0.5
Carburos recubiertos	0.4-0.6
Cerámicos	0.5-0.7

La ecuación anterior puede ser modificada considerando la profundidad de corte y el avance, siendo esta la siguiente (ecuación 2.3 y ecuación 2.4):

$$VT^n d^x f^y = C \quad 2.3$$

$$T = C^{1/n} V^{-1/n} d^{-x/n} f^{-y/n} \quad 2.4$$

Donde d es la profundidad de corte y f es el avance en mm/rev o in/rev, y los exponentes x y y se determinan de forma experimental.

Esta última relación supone que al incrementarse el avance o profundidad de corte se debe disminuir la velocidad de corte (y viceversa), y que, dependiendo de los exponentes, la reducción de velocidad puede producir un incremento en el volumen del material retirado, debido al aumento del avance o de la profundidad de corte.

Considerando lo anterior, es pertinente considerar la profundidad de desgaste permisible y la velocidad óptima de corte durante el maquinado para alargar la vida útil de las herramientas y evitar un desgaste acelerado.

Generalmente, el desgaste se clasifica de la siguiente manera (Kalpakjian, 2008):

- Desgaste de flanco.

Se da en la cara de alivio o flanco de la herramienta, como se muestra en la Figura 2.3 (a). Generalmente es atribuido al rozamiento de la herramienta con la superficie maquinada, lo que genera un desgaste abrasivo, y a las altas temperaturas que afectan las propiedades del material de la herramienta.

- Craterización.

Se da en la cara de ataque de la herramienta y cambia la geometría de contacto entre la herramienta y la viruta, como se aprecia en la Figura 2.3 (b). Los factores más significativos que favorecen su aparición son la temperatura en la interfaz herramienta-viruta y la afinidad química entre los materiales de la herramienta y la pieza de trabajo, además, los factores que influyen en el desgaste de flanco también influyen para la craterización.

Generalmente, este fenómeno se atribuye a un mecanismo de difusión, es decir, el movimiento de átomos entre herramienta y viruta. Esto se ve afectado por el incremento de la temperatura durante los procesos.

Un medio efectivo para reducir la velocidad del proceso de difusión es el recubrimiento de la herramienta con materiales como nitruro de titanio, carburo de titanio, carbonitruro de titanio y óxido de aluminio.

- Desgaste de la punta.

Es el redondeo que sufre la herramienta afilada debido a los efectos mecánicos y térmicos. Esto produce una pérdida de filo en la herramienta, afecta la formación de la viruta y produce rozamiento de la herramienta con la pieza de trabajo, generando una elevación de temperatura y una posible inducción de esfuerzos residuales en la superficie trabajada.

- Muescado.

La muesca o ranura se da en la región límite en que la viruta no se encuentra en contacto con la herramienta, conocida como línea de

profundidad de corte. Dicho límite oscila debido a las variaciones inherentes durante el corte y está en contacto con la capa endurecida generada por el corte anterior. Dependiendo la profundidad que presente, la muesca puede provocar astillado grave de la punta y sensibilidad a las muescas del material de la herramienta.

Igualmente, las capas de óxido, escoria y cascarilla en la superficie de trabajo contribuyen al desgaste de muesca debido a su dureza y propiedades abrasivas. En estos casos es recomendable una profundidad de corte mayor a estas capas o la capa endurecida por el trabajo sobre el material.

- Deformación plástica de la punta de la herramienta.

Es la deformación sufrida por una elevación importante de la temperatura, particularmente en herramientas de acero de alta velocidad, similar a la mostrada en la Figura 2.3 (d). Esto debido a que la elevación de temperatura en la zona de corte puede llegar a 1000°C durante el maquinado de aceros, e incluso superior en materiales más fuertes.

- Astillado.

El astillado es el rompimiento de un pequeño fragmento del filo de la herramienta, como se ve en la Figura 2.3 (c). Es característico en herramientas de materiales frágiles, como los cerámicos. Los fragmentos astillados pueden ser muy pequeños (microastillado o macroastillado), o relativamente grandes (astillado grueso, fractura gruesa y falla catastrófica, Figura 2.3 (f)).

Esta falla también puede ocurrir en regiones donde ya existe una pequeña grieta o defecto. El astillado, a diferencia del desgaste, es una pérdida súbita de material de la herramienta y el cambio consecuente de su forma, y tiene un efecto importante en el acabado e integridad superficial, al igual que la precisión dimensional de la

pieza. Sus causas principales son el impacto mecánico y la fatiga térmica.

Este problema puede reducirse seleccionando materiales para herramienta con alta resistencia al impacto y al choque térmico, cuidando los ángulos de ataque de la herramienta y vigilando el avance de la región de craterización.

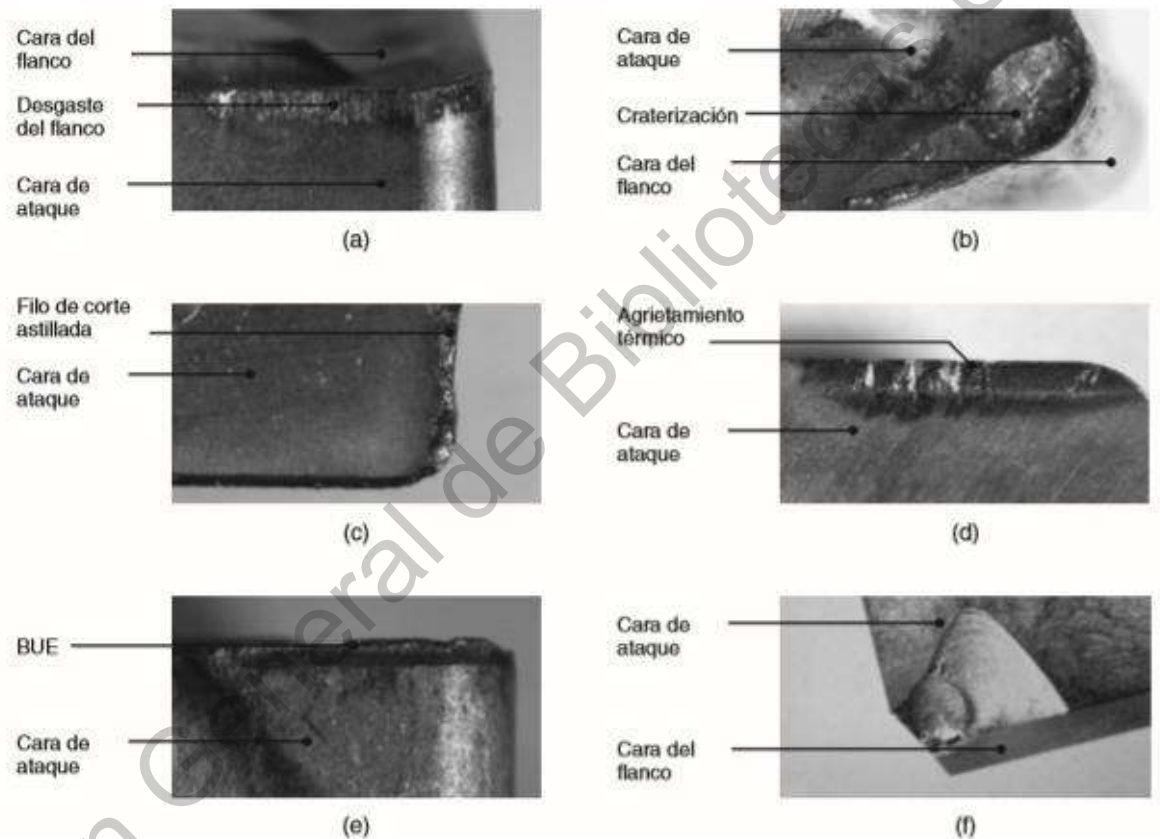


Figura 2.3. Distintos tipos de desgaste en herramientas durante el cilindrado: (a) desgaste del flanco; (b) craterización; (c) filo de corte astillado; (d) agrietamiento térmico en la cara de ataque; (e) borde acumulado (BUE); (f) falla catastrófica (Kalpakjian, 2008).

2.3 Flujo magnético externo.

Los motores eléctricos han ganado importancia dentro de todas las industrias en el último siglo. Para mejorar la confiabilidad de los sistemas industriales, uno de los objetivos más importantes en el mantenimiento es la detección de fallas con prontitud. Se han desarrollado técnicas para este fin basadas

en el análisis de vibraciones o señales de corriente, pues estas están relacionadas directamente con el estado eléctrico o mecánico del motor.

Penman desarrolló en la década de 1970 métodos basados en el análisis del campo magnético externo, teniendo como principales ventajas la simplicidad en la implementación y el hecho de no ser invasivas, aunque las desventajas de estos métodos residen en la dificultad para modelar el campo magnético que depende fuertemente del yugo del estator y la carcasa del motor ya que tienen un importante efecto de blindaje.

Los diversos desarrollos para el modelado del campo electromagnético se basan en la expresión analítica de la componente normal de la densidad de flujo del espacio de aire, denominada b^g , la cual se obtiene al multiplicar la fuerza magnetomotriz del espacio de aire resultante entre rotor y estator por la permeabilidad del espacio considerando las ranuras de la máquina. Tomando en cuenta un voltaje de alimentación con una frecuencia angular fundamental ω , b^g puede escribirse de la siguiente manera (ecuación 2.5):

$$b^g = \sum_k \sum_m b_{k,m}^g \quad 2.5$$

Considerando (ecuación 2.6):

$$b_{k,m}^g = \widehat{b_{k,m}^g} \cos(\omega_k t - m\alpha^s - \varphi_{k,m}) \quad 2.6$$

Donde ω_k es la frecuencia angular, que puede ser escrita también como $k\omega$, m es el número de polos y la magnitud de $b_{k,m}^g$ depende de los armónicos de suministro, los armónicos espaciales del estator y el rotor, y el efecto de ranura (estas variables dependen también del tipo de máquina: inducción o síncrona). α^s es la posición angular respecto al eje de referencia del estator. Estas variables se ilustran en la Figura 2.4.

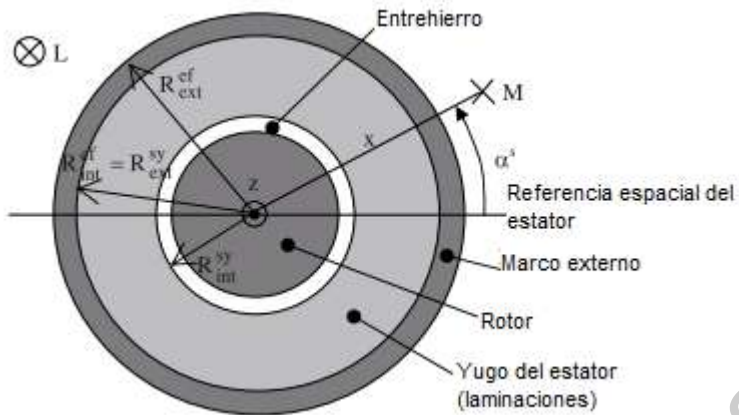


Figura 2.4. Geometría simplificada de un motor (Romary, 2009).

Para conocer la magnitud de las componentes de b^s en un punto M fuera de la máquina, a una distancia x se requiere identificar un coeficiente K tal que (ecuación 2.7):

$$\widehat{b_{k,m}^a} = K \widehat{b_{k,m}^g} \quad 2.7$$

K puede ser obtenido mediante la siguiente ecuación (ecuación 2.8):

$$K = K^{sy} K^{ef} K^a \quad 2.8$$

Donde K^{sy} corresponde al coeficiente de atenuación del yugo del estator, K^{ef} corresponde al coeficiente de atenuación del marco externo y K^a corresponde al coeficiente de atenuación del aire al exterior de la máquina, como se muestra en la Figura 2.5.

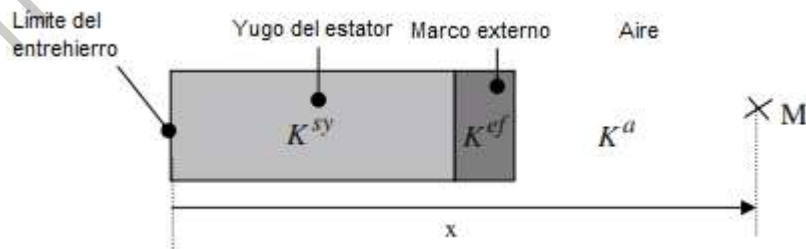


Figura 2.5. Representación de los medios de atenuación (Romary, 2009).

Además, debe considerarse el potencial del vector magnético, \vec{A} , el cual, considerando un medio con permeabilidad magnética μ y conductividad eléctrica σ ,

da paso a la siguiente ecuación, la cual al ser resuelta permite conocer de forma analítica el efecto de la atenuación para obtener el valor del flujo al exterior del campo con el uso de la ecuación 2.9 (Romary *et al*, 2009):

$$\overrightarrow{\text{curl}}\overrightarrow{\text{curl}}\vec{A} = -\mu\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad 2.9$$

La detección de fallas mediante el análisis del campo magnético externo se basa en la propiedad de que cualquier falla cambia el campo magnético en las cercanías de la máquina. Las dificultades para el modelado e interpretación del campo conllevan a explotar solamente sus características cualitativas, como la aparición de ciertas líneas espectrales (Romary *et al*, 2013).

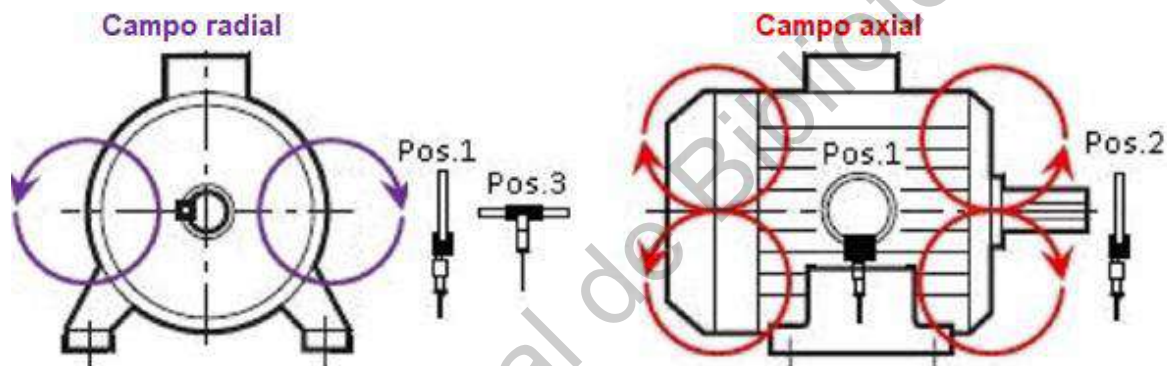


Figura 2.6. Flujo disperso alrededor del motor y posiciones comunes para colocar sensores de bobina (Romary *et al*, 2013).

Experimentalmente, se han desarrollado sensores de distintos tipos para su estudio, como bobinas de distintos tamaños, sensores de efecto Hall y basados en el efecto Magneto-Resistivo Gigante (GMR, por sus siglas en inglés). A partir de distintas investigaciones y estudios se han definido diversas ecuaciones para la identificación de frecuencias relacionadas con fallas en el rotor y el estator de la máquina, así como fallas de origen mecánico (Capolino *et al*, 2019), principal punto de interés dentro del presente trabajo, considerando para ello las direcciones axial y radial del flujo como se muestra en la Figura 2.6, donde la Pos.1 permite medir la combinación del flujo en la dirección axial, la Pos.2 permite la medición en la dirección axial y la Pos.3 permite la medición de la componente radial:

- Fallas mecánicas.

Este tipo de fallas representan más del 50% de fallas en máquinas eléctricas, son detectadas principalmente por análisis de vibraciones, pero las variables eléctricas y magnéticas también pueden proporcionar información importante. Algunas de estas fallas son debido a excentricidades, rodamientos, desalineamiento del eje y fallas en la transmisión.

Experimentalmente se han obtenido ecuaciones para determinar las frecuencias relacionadas con la excentricidad dinámica y la excentricidad estática (ecuaciones 2.10 y 2.11):

$$f = f_s \pm f_r \quad 2.10$$

$$f_{fault} = f_s \pm (kN_r \pm n_d)f_r \quad 2.11$$

Donde N_r es el número de ranuras en el rotor, $n_d = 0$ para la excentricidad estática y $n_d = 1, 2, 3$ para la excentricidad dinámica.

Algunas metodologías utilizadas para analizar estas frecuencias son la STFT y DWT, al igual que el uso de espectrogramas y órbitas de Lissajous.

2.4 Transformada de Fourier.

En el siglo XIX, el matemático francés Joseph Fourier demostró que cualquier función periódica podía ser representada como una suma infinita de funciones exponenciales complejas periódicas. Tiempo después, esto fue generalizado para funciones no periódicas y posteriormente para señales en tiempo discreto, creando variaciones de la Transformada de Fourier (FT, por sus siglas en inglés) para análisis más específicos.

La FT descompone una señal dada en funciones exponenciales complejas de distintas frecuencias, siendo definida por las siguientes ecuaciones (2.12 y 2.13):

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) * e^{-2\pi jft} dt \quad 2.12$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) * e^{2\pi jft} df \quad 2.13$$

Donde t es tiempo, f es frecuencia, x es la señal en el dominio del tiempo y X es la señal en el dominio de la frecuencia. La ecuación 2.12 es la transformada de Fourier de $x(t)$ y la ecuación 2.13 es la transformada inversa de Fourier de $X(f)$.

Debido a la formulación de la FT, la información que arroja corresponde a todos los instantes de tiempo, lo que implica que, sin importar en que instante aparezca en la señal una componente f , el resultado reflejará su existencia dentro de la señal. Es por esto por lo que la FT no es adecuada para señales no estacionarias cuya frecuencia varía con el tiempo si lo que se desea es conocer es el tiempo en que ciertas frecuencias se presentan (Polikar, 1996).

Para resolver esto, se buscó una forma de lograr una representación lineal tiempo-frecuencia que permitiera el análisis de las señales no estacionarias. Igualmente, se buscaron alternativas para reducir el tiempo de cómputo.

Para esto último se desarrolló la Transformada Rápida de Fourier (FFT), la cual es usada para calcular la Transformada Discreta de Fourier (DFT). La DFT convierte una secuencia finita de muestras de una función en el tiempo (señal discretizada) a una secuencia de muestras en el dominio de la frecuencia. La versión más general de la FFT fue publicada en 1965 por James Cooley y John Tukey (Weisstein, E. W., s. f.), sin embargo, existen un gran número de algoritmos para su cálculo, los cuales se basan en la definición de la DFT (ecuación 2.14):

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j2\pi kn/N} \quad 2.14$$

Donde $k=0, \dots, N-1$ y $e^{-j2\pi kn/N}$ es una raíz de 1.

La importancia de esta transformada se encuentra en que permitió trabajar en el dominio de la frecuencia posible, computacionalmente hablando, como si se trabajara en el dominio del tiempo o espacio, consiguiendo ser ampliamente usada en campos como la ingeniería, ciencia, música y matemáticas.

Por otro lado, para tener una mejor representación tiempo-frecuencia se desarrolló la Transformada de Fourier de Tiempo Corto (STFT), la cual pretende analizar una señal cambiante en el tiempo por medio de ventanas lo suficientemente pequeñas para que la fracción de la señal que sea analizada pueda considerarse estacionaria.

$$STFT_x^{(\omega)}(t', f) = \int_t [x(t) * \omega^*(t - t')] * e^{-j2\pi ft} dt \quad 2.15$$

La ecuación 2.15 es la definición de las STFT. La señal está indicada como $x(t)$, $w(t)$ es la función de ventana y el $*$ indica el conjugado complejo. En esta función, la señal de entrada se multiplica por una función de ventana, la cual se desplaza cierto intervalo de tiempo, y se obtiene la FT de dicho producto. Esto nos permite obtener la representación espacio tiempo de la señal.

Sin embargo, uno de los principales problemas con la STFT tiene que ver con la resolución. Debido al Principio de Incertidumbre de Heisenberg, el cual estipula que no es posible conocer el momento y la posición de una partícula en movimiento, no es posible conocer la representación exacta en tiempo-frecuencia de una señal. Esto provoca un problema de resolución en el cual solo es posible conocer que bandas frecuenciales existen en cierto intervalo de tiempo (Polikar, 1996).

2.5 Transformada Wavelet.

A finales de la década de 1970, J. Morlet se encontró con un problema en el uso de la STFT, su uso permitía analizar altas componentes frecuenciales utilizando ventanas más pequeñas o componentes frecuenciales bajas usando ventanas más amplias, pero no ambas. Para resolver esto, decidió emplear funciones de ventana diferentes para analizar diferentes bandas de frecuencias, las cuales eran generadas por la dilatación o compresión de una función Gaussiana a las que llamó *wavelets* de forma constante.

En los años siguientes se desarrollaron (o redescubrieron) diversas funciones *wavelet* para conseguir un mejor análisis tiempo-frecuencia, sentando el

desarrollo de la Transformada Wavelet Continua (CWT). Posteriormente, Ingrid Daubechies desarrolló los marcos *wavelet* para la discretización del tiempo y los parámetros de escala de la transformada wavelet, por lo que se le acredita el desarrollo de la transición del análisis de señales continuas a discretas junto a Stephane Mallat, quien desarrolló la idea del análisis multi-resolución (MRA, por sus siglas en inglés) para desarrollar la discretización de la Transformada Wavelet (Polikar, 1996).

El MRA consiste en analizar la señal a diferentes frecuencias con diferentes resoluciones, está diseñado para dar buena resolución en tiempo con baja resolución en frecuencia para altas frecuencias y buena resolución en frecuencia con baja resolución en tiempo para bajas frecuencias (Polikar, 1996).

Como se ha mencionado, la CWT es una alternativa a la STFT para evitar el problema de resolución y está definida por la ecuación 2.16:

$$CWT_x^\psi(\tau, s) = \Psi_x^\psi(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int x(t) \psi^* \left(\frac{t - \tau}{s} \right) dt \quad 2.16$$

Como se puede observar, la señal transformada es una función de dos variables, *tau* y *s* que son los parámetros de traslación y escala, respectivamente. Psi es la función de transformación y es llamada "*wavelet* madre", esto debido a dos propiedades importantes: *wavelet* se significa pequeña ola y se refiere al tamaño finito de la función y su condición oscilatoria, mientras que el término "madre" implica que las funciones utilizadas en diferentes regiones derivan de una función principal, es decir, esta función es el prototipo para generar otras funciones de ventana.

El término traslación se relaciona con la localización de la ventana a lo largo de la señal y corresponde a la información en tiempo. El término escala se define como 1/frecuencia y es similar a la escala utilizada en mapas, bajas frecuencias (escalas grandes) corresponden a información global de la señal y altas frecuencias (escalas pequeñas) corresponden a información detallada de la señal. Esto se ilustra de mejor manera en la Figura 2.7.

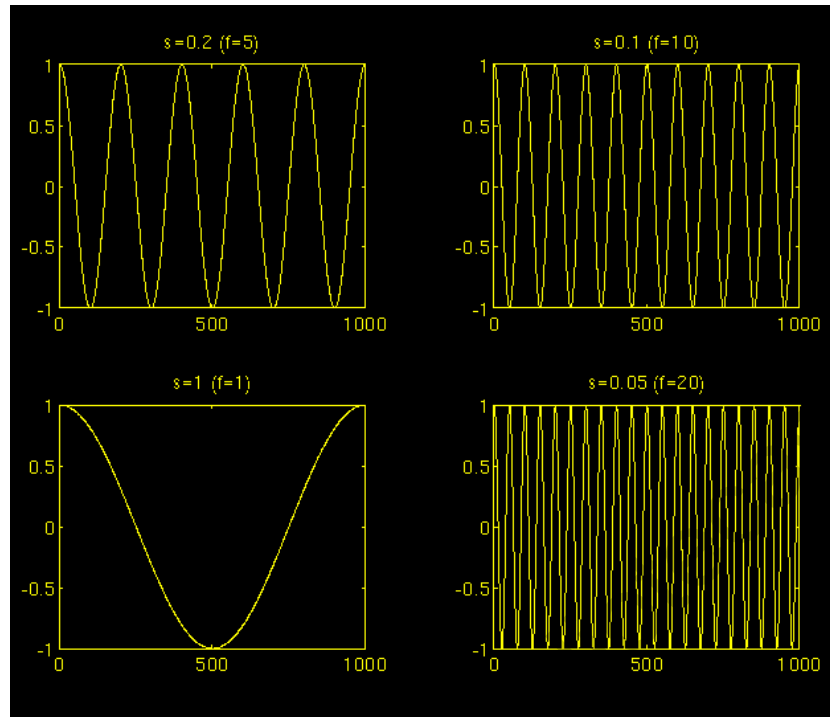


Figura 2.7. Ejemplo de señales cosenoidales a distintas escalas (Polikar, 1996).

Para solucionar el problema de la resolución se toma la Figura 2.8 como ejemplo. En ella es posible apreciar que, aunque el largo y ancho de cada espacio cambia, el área es constante. Estos recuadros representan una porción igual del plano tiempo-frecuencia con proporciones diferentes de ambas variables y corresponde con lo mencionado sobre la escala, teniendo mejor resolución en frecuencia con menor resolución en tiempo en los recuadros inferiores y menor resolución en frecuencia con mejor resolución en tiempo en los recuadros superiores.

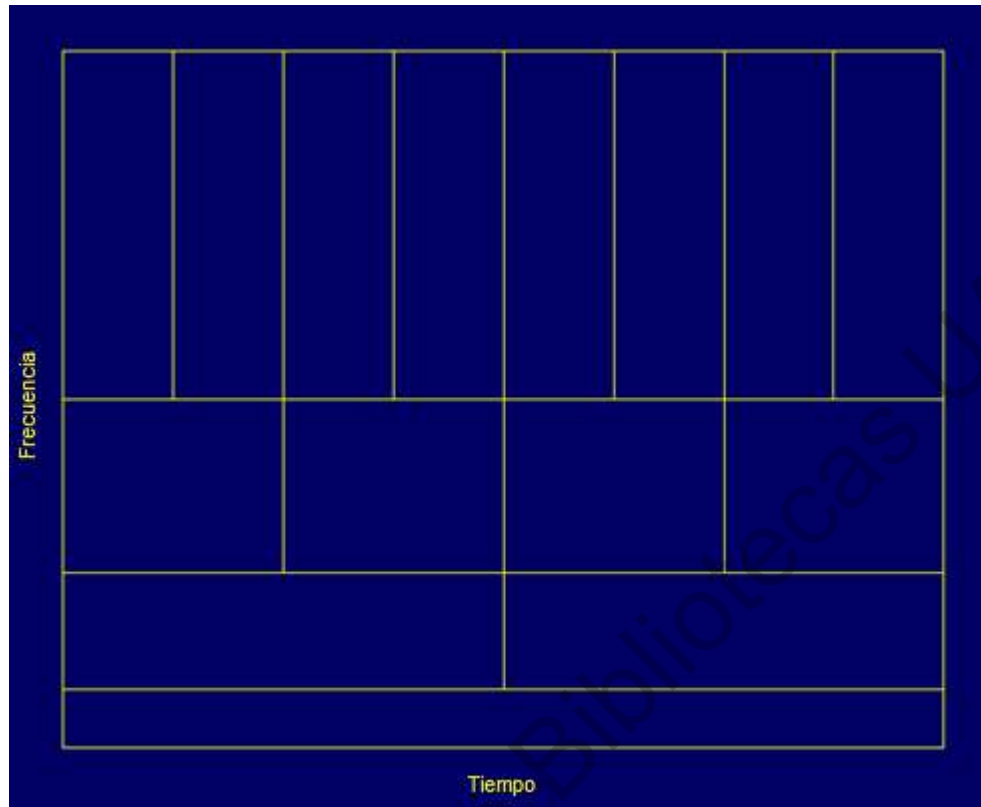


Figura 2.8. Ilustración de la distribución tiempo-frecuencia con el uso de wavelets (Polikar, 1996).

La DWT, mencionada anteriormente, se basa en la codificación de sub-banda y MRA. Para esto, la señal se hace pasar por filtros de diferente frecuencia de corte (filtros tipo paso-alto y paso-bajo) para analizar las distintas frecuencias. Durante este proceso la resolución de la señal es modificada por el proceso de filtrado y la escala es modificada mediante operaciones de sobremuestreo y submuestreo.

La DWT analiza la señal en diferentes bandas de frecuencias con diferentes resoluciones al descomponer la señal en una aproximación e información detallada. Se emplean dos funciones, llamadas funciones de escala y funciones *wavelet*, asociadas con los filtros paso-bajo y paso-alto, respectivamente. Para descomponer la señal en bandas de distinta frecuencia se filtra sucesivamente con los filtros mencionados anteriormente en el dominio del tiempo. La señal original $x[n]$ pasa por el filtro paso-alto de media banda $g[n]$ y el filtro paso-bajo $h[n]$. Posteriormente, la mitad de las muestras pueden ser eliminadas de acuerdo con la regla de Nyquist

ya que la señal ahora cuenta con la mitad del rango de frecuencia original, siendo submuestreada en un factor de dos. Este nivel de descomposición es expresado matemáticamente de la siguiente manera (ecuaciones 2.17 y 2.18):

$$y_{high}[k] = \sum_n x[n] * g[2k - n] \quad 2.17$$

$$y_{low}[k] = \sum_n x[n] * h[2k - n] \quad 2.18$$

Donde y_{high} y y_{low} son las salidas de los filtros paso-alto y paso-bajo, respectivamente.

Esto reduce a la mitad la resolución en tiempo al caracterizar la señal con la mitad de las muestras y duplica la resolución en frecuencia al reducir el ancho de banda a la mitad. Este proceso es la codificación de sub-banda y es repetido de forma continua para obtener los coeficientes de la DWT, como se muestra en la Figura 2.9.

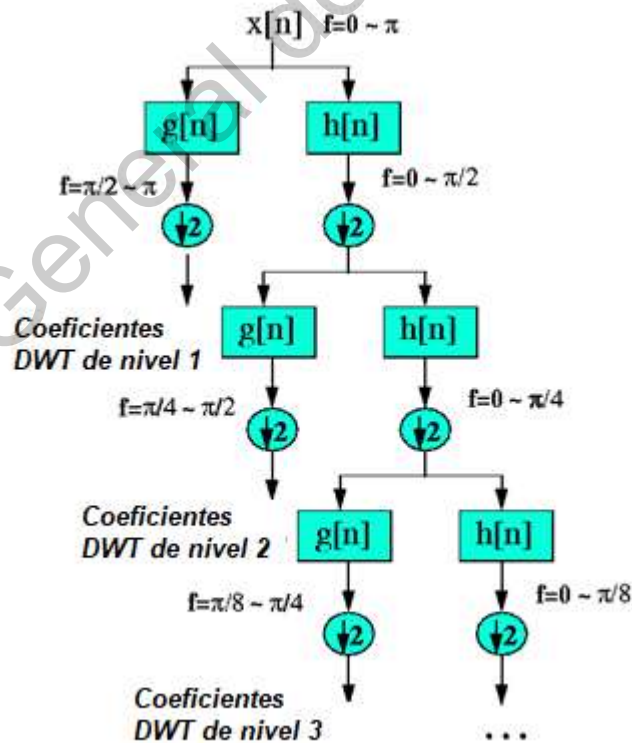


Figura 2.9. Ilustración del algoritmo de codificación de sub-banda (Polikar, 1996).

Es importante mencionar que las respuestas al impulso de los filtros están relacionadas y no son independientes uno del otro, como lo muestra la ecuación 2.19, donde $g[n]$ es el paso-alto, $h[n]$ es el paso-bajo y L es el número de puntos o largo del filtro:

$$g[L - 1 - n] = (-1)^n * h[n] \quad 2.19$$

Igualmente, es posible la reconstrucción de la señal a partir de la ecuación 2.20, aunque esta no será lograda si los filtros de media banda no son ideales, sin embargo, en ciertas condiciones es posible encontrar filtros que permitan una reconstrucción perfecta, como los diseñados por Ingrid Daubechies.

$$x[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} (y_{high}[k] * g[-n + 2k]) + (y_{low}[k] * h[-n + 2k]) \quad 2.20$$

2.6 Parámetros estadísticos.

En estadística, un parámetro es una magnitud que resume los datos que pueden derivarse del estudio de una variable estadística. El cálculo de este número está bien definido, usualmente mediante una fórmula aritmética obtenida a partir de datos de la población. Los parámetros estadísticos sirven para crear un modelo de la realidad (Ross, 2007) (Moreno-Gil, 1998).

Existen distintos tipos de parámetros, los cuales se agrupan en las siguientes categorías y se profundizará en los considerados dentro de este trabajo:

- Medidas de posición: Son valores de la variable que se caracterizan por la posición que ocupan dentro del rango de valores posibles y se dividen en dos grupos:
 - Medidas de tendencia central: como media, mediana y moda.
 - Media. La media aritmética, o promedio, de un conjunto de valores es el valor característico de una serie de datos cuantitativos. Es la medida de tendencia central que se calcula al sumar los valores y dividir el total entre el número de valores. La ecuación 2.21

muestra la definición de la media, con n como el total de datos y x_i como el valor actual (Triola *et al*, 2012).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad 2.21$$

- Mediana. Es la medida de tendencia central que implica el valor intermedio, cuando los valores de los datos originales se presentan en orden de magnitud creciente (o decreciente) (Triola *et al*, 2012).
- Valor RMS. En matemáticas, la media cuadrática, valor cuadrático medio, raíz de la media cuadrática o RMS (del inglés root mean square) es una medida estadística de la magnitud de una cantidad variable. Puede calcularse para una serie de valores discretos o para una función matemática de variable continua. El nombre deriva del hecho de que es la raíz cuadrada de la media aritmética de los cuadrados de los valores. La ecuación 2.22 muestra la definición del valor RMS, con T como el tiempo total de integración y x la señal original (Weisstein, E., 2020) (Jones, 2018) (Thompson, 1965).

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [x(t)]^2 dt} \quad 2.22$$

- Medidas de posición no central: cuantiles (cuartiles, deciles y percentiles).
- Medidas de dispersión: Son indicadores de la heterogeneidad de los datos, indicando la separación entre ellos y se dividen en dos tipos:
 - Medidas de dispersión absoluta: están dadas en las mismas unidades de la variable y algunos ejemplos son la desviación media, varianza y desviación estándar.

- Desviación estándar. Es la medida de variación de los valores con respecto a la media. Es un tipo de desviación promedio de los valores con respecto a la media aritmética del conjunto de datos (Triola *et al*, 2012). Una desviación estándar baja indica que la mayor parte de los datos de una muestra tienden a estar agrupados cerca de su media (también denominada el valor esperado), mientras que una desviación estándar alta indica que los datos se extienden sobre un rango de valores más amplio. La ecuación 2.23 muestra la definición de la desviación estándar, con N como el total de datos, x_i el valor actual y μ como la media aritmética.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad 2.23$$

- Medidas de dispersión relativa: informan la dispersión en términos relativos, como porcentaje, y algunos ejemplos son los coeficientes de variación y de apertura.
- Medidas de forma: Su valor informa sobre el aspecto de la gráfica de distribución de los datos.
 - Asimetría. Las medidas de asimetría (o skewness en inglés) son indicadores que permiten establecer el grado de simetría (o asimetría) que presenta una distribución de probabilidad de una variable. Si una distribución es simétrica, existe el mismo número de valores a la derecha que a la izquierda de la media. Decimos que hay asimetría positiva (o a la derecha) si la "cola" a la derecha de la media es más larga que la de la izquierda, es decir, si hay valores más separados de la media a la derecha. Diremos que hay asimetría negativa (o a la izquierda) si la "cola" a la izquierda de la media es más larga

que la de la derecha, es decir, si hay valores más separados de la media a la izquierda (Martínez *et al*, 2012) (Murray *et al*, 2010). La ecuación 2.24 muestra la definición de la asimetría, donde μ es la media de x , σ es la desviación estándar y $E(t)$ representa el valor esperado de la cantidad t , el cual es calculado dentro de la función *skewness* en Matlab. (MathWorks, 2020).

$$s = \frac{E(x - \mu)^3}{\sigma^3} \quad 2.24$$

- Curtosis. La curtosis de una variable estadística/aleatoria es una característica de forma de su distribución de frecuencias/probabilidad, siendo una medida de la altura de la curva. Según su concepción clásica, una curtosis grande implica una mayor concentración de valores de la variable tanto muy cerca de la media de la distribución (pico) como muy lejos de ella (colas), al tiempo que existe una relativamente menor frecuencia de valores intermedios (Martínez *et al*, 2012) (Murray *et al*, 2010). La ecuación 2.25 muestra la definición de la asimetría, donde μ es la media de x , σ es la desviación estándar y $E(t)$ representa el valor esperado de la cantidad t , el cual es calculado dentro de la función *kurtosis* en Matlab (MathWorks, 2020).

$$k = \frac{E(x - \mu)^4}{\sigma^4} \quad 2.25$$

- Parámetros con propósito específico: como su nombre lo sugiere, son parámetros que se utilizan en situaciones concretas o para realizar un tipo de análisis en especial.
 - Energía. Para el cálculo de la energía se utilizó un parámetro definido como γ_{DWT} , el cual se basa en la energía de cualquier señal *wavelet* afectada por las componentes relacionadas al proceso de interés. Es la relación inversa entre la energía de

la *wavelet* seleccionada y le energía de la señal original muestreada, siendo un indicador normalizado y expresado en dB. En la ecuación 2.26 se muestra la definición utilizada, donde emf_j es el valor j -ésimo de la señal muestreada, $d_i(j)$ es el elemento j de la *wavelet*, N_s es el número de la muestra final del intervalo considerado y N_b es el número de la muestra inicial del intervalo. De acuerdo con esta definición, mientras mayor sea el valor de γ_{DWT} , menor será la energía de la *wavelet* (Antonino-Daviu *et al*, 2017).

$$\gamma_{DWT}(dB) = 10 * \log \left[\frac{\sum_{j=N_b}^{N_s} emf_j^2}{\sum_{j=N_b}^{N_s} [d_i(j)]^2} \right] \quad 2.26$$

- o Factor de forma. Para una onda de corriente alterna (señal) es la relación del valor RMS (raíz cuadrática media) al valor promedio (media matemática de todos los puntos en la forma de onda). Identifica la relación de la corriente continua de igual potencia en relación con la corriente alterna dada. En la ecuación 2.27 se expresa el factor de forma, donde T es el tiempo total de la integración y x es la señal muestreada (Kuphaldt, 2020).

$$k_f = \frac{RMS}{ARV} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [x(t)]^2 dt}}{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} |x(t)| dt} \quad 2.27$$

- o Factor de cresta. Es un parámetro de una forma de onda que muestra la relación entre los valores máximos y el valor efectivo. En otras palabras, el factor de cresta indica cuán extremos son los picos en una forma de onda. El factor de cresta 1 indica que no hay picos, como la corriente continua o una onda cuadrada. Los factores de cresta más altos indican picos, por ejemplo, las ondas de sonido tienden a

tener factores de cresta altos. En la ecuación 2.28 se muestra la expresión utilizada, donde x_{peak} es el valor máximo y x_{rms} el valor efectivo (Yokogawa Test & Measurement Corporation, 2020).

$$C = \frac{|x_{peak}|}{x_{rms}} \quad 2.28$$

- o Relación pico a potencia promedio. Denominado PAPR (del inglés, Peak-to-Average Power Ratio), es la amplitud máxima al cuadrado (que proporciona la potencia máxima) dividida por el valor RMS al cuadrado (que proporciona la potencia media) (ATIS Telecom Glossary, 2020). Es el cuadrado del factor de cresta (labAlive experiment, 2020). En la ecuación 2.29 se muestra la definición utilizada.

$$PAPR_{dB} = 10 * \log_{10} \left(\frac{|x_{peak}|^2}{x_{rms}^2} \right) \quad 2.29$$

- o Entropía de Shannon. También llamada Entropía de la información, mide la incertidumbre de una fuente de información, es también la cantidad de «ruido» o «desorden» que contiene o libera un sistema. Está relacionada con la incertidumbre que existe en cualquier experimento o señal aleatoria. En la ecuación 2.30 se muestra la definición de la Entropía de Shannon, $H(X)$, de una señal X , con posibles valores x_i con probabilidad de ocurrencia $p(x_i)$ (Shannon, 1948).

$$H(X) = - \sum_i p(x_i) \log_2 p(x_i) \quad 2.30$$

Capítulo 3 : Metodología.

La Figura 3.1 muestra el diagrama a bloques de la metodología desarrollada en este trabajo. Se compone de dos bloques principales:

- Banco de pruebas para la adquisición de la información.
- Bloque de procesamiento para obtener la información útil para el proyecto.

El primer bloque corresponde al banco de pruebas para la obtención de los datos relacionados a la variación del flujo externo según el estado de la herramienta de corte durante el proceso de desbaste. Para ello se utilizarán los sensores lineales de efecto Hall A1325, los cuales tendrán un circuito de acondicionamiento para obtener una señal con amplitud adecuada para el posterior análisis, la cual será capturada haciendo uso del convertidor analógico digital de la tarjeta MSP-EXP432P401R de Texas Instruments. Igualmente, se realizará una matriz de pruebas, la cual tendrá como parámetro variable la profundidad total del corte.

El segundo bloque corresponde a las etapas para el procesamiento de las señales adquiridas con los sensores de efecto Hall A1325, colocados cerca del eje del motor. En la primera etapa se obtienen los datos con la tarjeta MSP-EXP432P401R y se almacenan las lecturas para su posterior análisis. La segunda etapa consiste en el procesamiento para poder aislar las características que permitan relacionar las alteraciones en el sf con el nivel de desgaste de la herramienta mediante el uso de técnicas de descomposición tiempo-frecuencia, como la DWT. Posteriormente se calculan valores estadísticos para encontrar un indicador que permita una mejor identificación del fenómeno y la selección del que proporcione una relación más estrecha entre las variables. Una vez realizado lo anterior, se procede a mostrar la información obtenida para su análisis e interpretación.

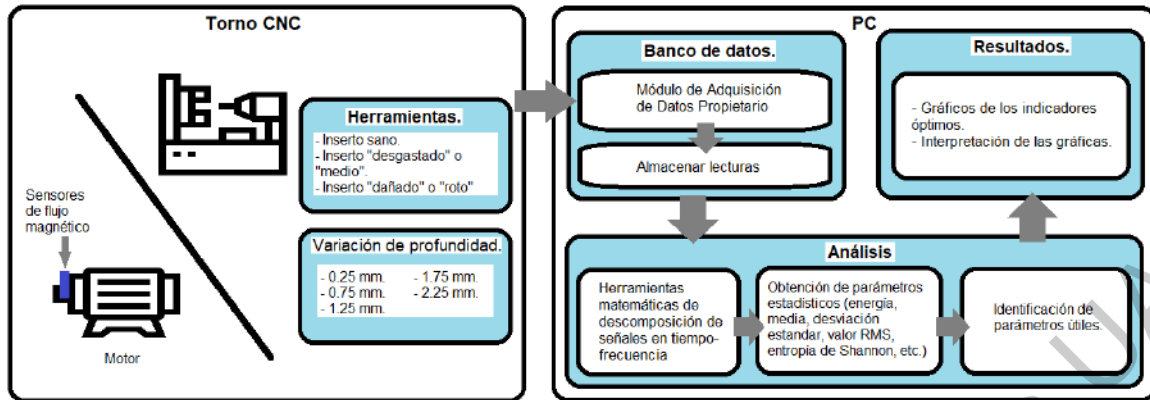


Figura 3.1. Diagrama que ilustra la metodología seguida.

3.1 Materiales y equipos.

3.1.1 Sensores de efecto Hall.

Como elemento de medición se utilizaron tres sensores lineales de efecto Hall A1325 de Allegro Microsystems (Allegro Microsystems, 2020) que se muestran en la figura 3.2. Estos sensores fueron seleccionados debido a sus características, mismas que cumplen con los requerimientos mínimos para los fines de esta investigación:

- Proporcionan una salida de voltaje proporcional al campo magnético aplicado.
- Cuentan con una salida de voltaje de reposo del 50% del voltaje de suministro.
- Presenta una sensibilidad de fábrica de 3.125mV/G.
- Son elementos de alta precisión, bajo nivel de ruido a la salida.
- Su rango de temperatura es de -40°C a 150°C.
- Cada circuito integra un elemento Hall, un circuito de compensación de temperatura para reducir la deriva de sensibilidad intrínseca del elemento Hall, un amplificador de alta ganancia de pequeña señal, una etapa de salida de baja impedancia fija y una técnica patentada de cancelación de compensación dinámica.

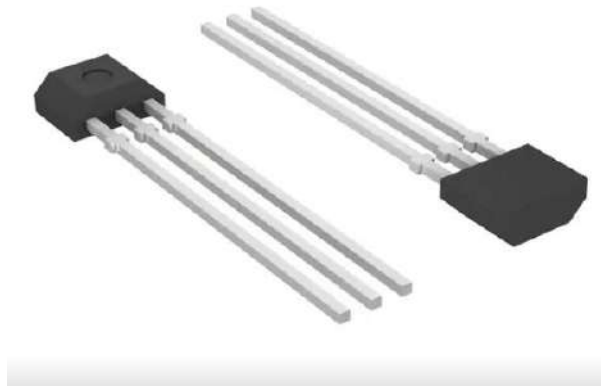


Figura 3.2. Sensores lineales de efecto Hall A1325 (Allegro MicroSystems, 2020).

En la Figura 3.3 se muestra una fotografía de la tarjeta diseñada para la medición de las señales de flujo con los sensores mencionados y el circuito de acondicionamiento para que la tarjeta de adquisición logre una mejor captura de la información. Se señalan con un círculo de color amarillo la ubicación de los sensores: el sensor 1 (parte superior) captura la combinación de flujo axial y radial, el sensor 2 (parte media) captura principalmente la componente radial del flujo y el sensor 3 (parte baja) captura mayormente la componente axial.

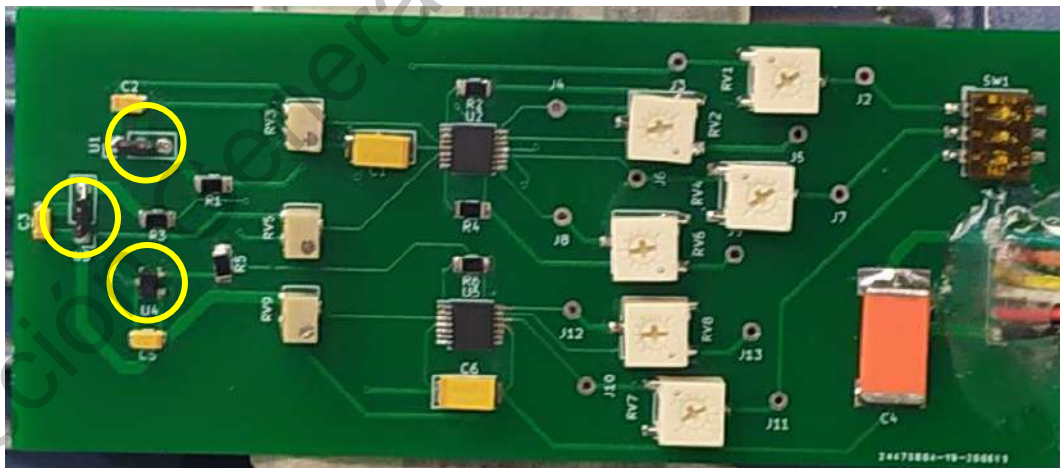


Figura 3.3. Fotografía de la tarjeta diseñada para la captura de las señales de flujo.

3.1.2 Tarjeta de adquisición.

La tarjeta utilizada para la adquisición de datos es una tarjeta de desarrollo modelo MSP-EXP432P401R marca Texas Instruments (Texas Instruments, 2020), que se muestra en la Figura 3.4. Algunas de sus características son:

- Procesador de 32 bits, con frecuencia de hasta 48MHz.
- Convertidor analógico digital de 16 bits y capacidad de 1Msps, referencia de voltaje interna y dos comparadores analógicos.
- Memoria flash principal de hasta 256KB, 16KB de memoria flash para información, 64KB de SRAM y 32KB de ROM.
- Oscilador/reloj de características flexibles (programables).
- Voltaje de suministro de 1.62V a 3.7V.
- Temperatura de operación de -40°C a 85°C
- Comunicación serial: UART, IrDA, SPI, I²C.
- Hasta 48 entradas/salidas.



Figura 3.4. Tarjeta de desarrollo MSP-EXP432P401R (Texas Instruments, 2020).

3.1.3 Torno CNC.

Las pruebas se realizaron en un torno CNC DYNAMACH con controlador Fanuc Oi Mate-TC (cncmanual.com, 2021) ubicado en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro campus San Juan del Río, el cual se muestra en la Figura 3.5.

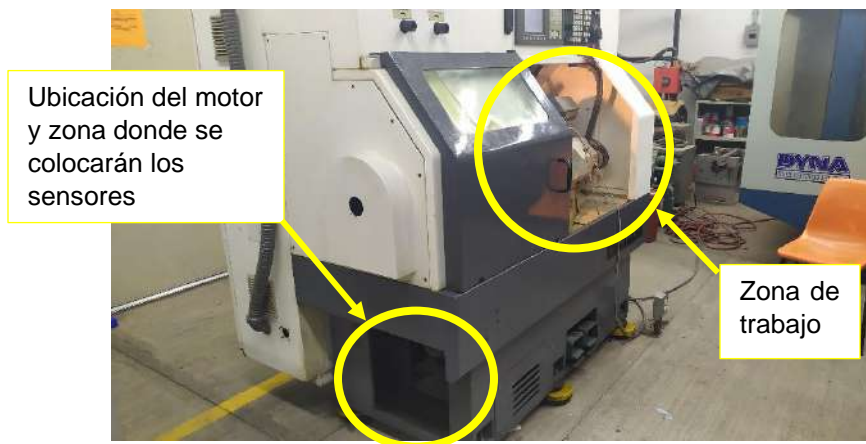


Figura 3.5. Torno CNC utilizado para la realización de las pruebas.

El motor de husillo instalado en la máquina de torneado es un motor de inducción trifásico (modelo Realland Smart Motors P96AR06D4152704) que tiene 4 polos, una potencia nominal de 3.7 KW y se alimenta con un variador de frecuencia a 220 Vac.

3.1.4 Material maquinado.

El material maquinado es Aluminio 6061, en barras de 1.5 pulgadas de diámetro y 5 pulgadas de largo. Esta es una aleación de aluminio endurecida por precipitación, que contiene magnesio y silicio como sus principales elementos de aleación. Tiene buenas propiedades mecánicas, exhibe buena soldabilidad y es muy comúnmente extruido, por lo que es una de las aleaciones de uso general. Algunas de sus propiedades se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Propiedades del Aluminio 6061 (MakeltFrom.com, 2020).

Propiedades físicas.	
Densidad (ρ)	2.70 g/cm ³
Propiedades mecánicas	
Módulo de Young (E)	69 GPa (10x10 ⁶ psi)
Resistencia a la tracción (σ_t)	130–410 MPa (19-60x10 ³ psi)
Alargamiento a la rotura (ϵ)	3.4-20%
Coefficiente de Poisson (ν)	0.33
Propiedades térmicas	

Temperatura de fusión (T_m)	580 °C (1,080 °F)
Conductividad térmica (k)	170 W/(m·K)
Coeficiente de expansión térmica lineal (α)	$2.4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
Capacidad calorífica específica (c)	900 J/(kg·K)

3.1.5 Herramientas de corte.

Las herramientas de corte utilizadas fueron tres insertos de carburo, como el que se muestra en la figura 3.6, con distinto estado de desgaste: el primer inserto no había sufrido ningún desgaste (considerado como nuevo), el segundo inserto presentaba un desgaste medio (desgaste de la punta) y el tercero presentaba un desgaste mayor de la punta y la cara (considerado como herramienta rota).

En las figuras 3.7 y 3.8 se muestran tablas con información de los insertos. La figura 3.7 muestra información general de los insertos, la cual fue obtenida del sitio travers.com.mx, donde fueron adquiridos los insertos. Por su parte, la figura 3.8, obtenida también del catálogo de travers.com.mx, muestra información de los materiales adecuados para trabajar con dichos insertos.



Figura 3.6. Fotografía del inserto "dañado" utilizado para las pruebas.

INFORMACIÓN DE PRODUCTO	
Marca	TERRA CARBIDE
Ventajas	Características: APC2 Sin recubrimiento C2 APC5 Sin recubrimiento C5 APC5T Recubrimiento TIN C5
C.I.	3/8"
Forma y Ángulo	60° Triangular
Grado	APC2
Grosor	5/32"
No. de Inserto	TCMT3(2.5)1
Radio	0.016"

Figura 3.7. Tabla de información del inserto (travers.com.mx, 2020).

# INSERTO	GRADO	C.I.	ESPESOR	RADIO	ACERO	ACERO INOXIDABLE	FUNDICIÓN	ALEACIONES ESPECIALES	NO FERROSO	ACEROS ENDURECIDOS
CCMT										
CCMT2(1.5)2	APC5T	1/4"	3/32"	0.031"	•	•				
CCMT2(1.5)1-MP1	APC5T	3/8"	5/32"	0.016"	•	•				
CCMT21.51-FP1	APC5T	3/8"	5/32"	0.031"	•	•				
SPU										
SPU421	APC2	1/2"	1/8"	0.016"	•		•	•	•	•
SPU422	APC2	1/2"	1/8"	0.031"	•		•	•	•	•
SPU422	APC5	1/2"	1/8"	0.031"	•	•				
SPU533	APC2	5/8"	3/16"	0.047"	•		•	•	•	•
SPU633	APC2	3/4"	3/16"	0.047"	•		•	•	•	•
SPU634	APC2	3/4"	3/16"	0.063"	•		•	•	•	•
SPU634	APC5	3/4"	3/16"	0.063"	•	•				
TCMT										
TCMT3(2.5)1	APC2	3/8"	5/32"	0.016"	•		•	•	•	•
TCMT3(2.5)1	APC5	3/8"	5/32"	0.016"	•	•				

Figura 3.8. Tabla con información de los insertos (travers.com.mx, 2020).

3.2 Métodos.

3.2.1 Matriz de pruebas.

La matriz de pruebas diseñada para las pruebas se muestra en la Tabla 3.2. Para cada prueba se realizó un ciclo de tres cortes o desbastes a la pieza. Las pruebas se realizaron variando la profundidad total de corte mientras los demás parámetros permanecieron constantes.

Dentro de la Tabla 3.2, los parámetros considerados son:

- a_p : profundidad de corte.
- f : avance de la herramienta.
- V_c : velocidad superficial de la pieza de trabajo.
- N : número de revoluciones por minuto.
- V_f : velocidad de avance lineal de la herramienta.

Tabla 3.2. Matriz de pruebas. Variación de profundidad de corte.

No.	a_p (mm)	f (mm/rev)	V_c (m/min)	N (rpm)	V_f (mm/min)
1	0.25	0.080	200.0	1670.914	133.673
2	0.75	0.080	200.0	1670.914	133.673
3	1.25	0.080	200.0	1670.914	133.673
4	1.75	0.080	200.0	1670.914	133.673
5	2.25	0.080	200.0	1670.914	133.673

3.2.2 Procesamiento de las señales.

Para el procesamiento de las señales se hizo uso de Matlab para ejecutar de forma rápida y sencilla las operaciones para el cálculo de los parámetros de interés.

- Acondicionamiento de las señales e identificación de tiempos de corte.

Debido a la forma de funcionamiento de los sensores seleccionados, las señales obtenidas están montadas sobre una componente de DC, como puede observarse en la figura 3.9, donde se tiene una componente de voltaje continuo cercana a los 1.2V, la cual puede afectar el análisis de tiempo-frecuencia y provocar resultados incorrectos. Para realizar el análisis se utilizó el entorno de Matlab, una vez ingresadas las señales al software se procedió a restar el *offset* de la señal para obtener datos que sean de mayor utilidad. Realizado esto, es necesario identificar los tiempos en que cada corte fue realizado según lo mostrado en las señales obtenidas, sirviéndonos de las gráficas de la información de los sensores, esto debido a que el conocer los tiempos permitirá el cálculo de los parámetros estadísticos para el análisis.

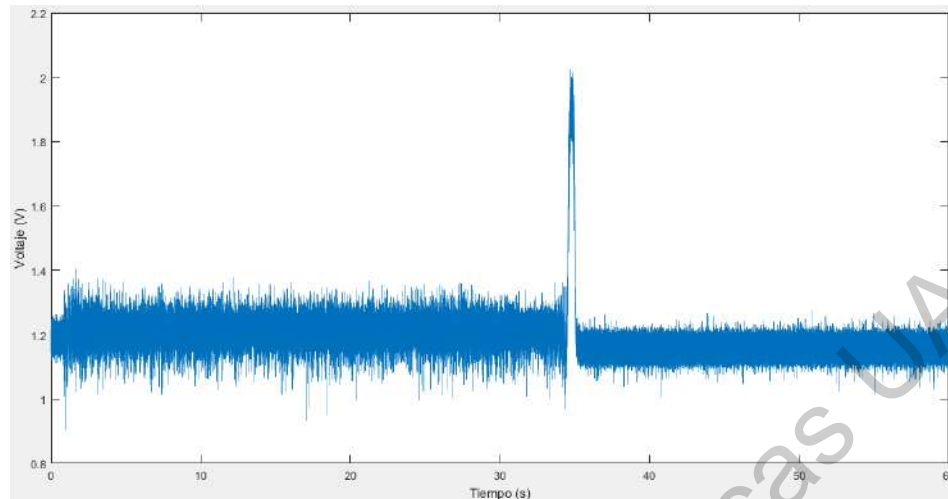


Figura 3.9. Señal correspondiente al corte de 1.25mm de profundidad con el inserto "dañado" medida con el sensor 1 (flujo axial y radial).

- Aplicación de la DWT a las señales del banco de datos.
Como se mencionó en la sección de Fundamentación Teórica, la DWT se emplea para aislar las bandas de frecuencias que componen una señal, esto permite observar de manera aislada la aparición de componentes que se relacionan a un fenómeno específico, en este caso, el efecto del corte de la herramienta sobre el flujo magnético al exterior del motor del husillo de la máquina. Para aplicar esta transformada se hizo uso del software Matlab y sus funciones, específicamente la función *wavedec*:

$$[c, l] = \text{wavedec}(x, n, \text{wname})$$

Esta función devuelve la descomposición de la señal x en un nivel n aplicando la familia wavelet madre indicada por el parámetro "wname", la cual puede ser del tipo Daubechies, Coiflets, Symlets, discrete Meyer, biortogonal o biortogonal invertida. La descomposición consiste en el vector de descomposición *wavelet* c y el vector l que contiene el número de coeficientes por nivel. La wavelet madre utilizada fue el tipo "db44", esto debido a que diversos trabajos han mostrado que el uso de filtros Daubechies de orden mayor permiten una mejor extracción de información y su

comportamiento es casi ideal, reduciendo el traslape entre bandas contiguas (Zamudio *et al*, 2019).

- Cálculo de los parámetros estadísticos de la señal.

Una vez realizada la descomposición de la señal original, se procede a realizar el cálculo de parámetros estadísticos para cada una de las señales registradas con la finalidad de buscar aquellos que nos permitan establecer alguna relación de causalidad que cumpla con los objetivos de esta investigación.

Los parámetros calculados fueron:

- Energía.
 - Factor de forma.
 - Factor de cresta.
 - Entropía de Shannon.
 - Desviación estándar.
 - Media.
 - Mediana.
 - Asimetría.
 - Curtosis.
 - Valor RMS.
- Selección y presentación de la información obtenida.

De los parámetros calculados, la energía de las señales permite identificar de mejor forma los cambios en el estado de las distintas señales. Una vez identificado el parámetro, se hace uso de las funciones de Matlab para graficar los niveles de energía por sensor para cada una de las profundidades de corte, obteniendo así un gráfico que permite comparar directamente las lecturas y evaluar los efectos del desgaste de las herramientas sobre el flujo medido.

Capítulo 4 : Resultados.

4.1 Herramientas de corte.

Para la realización de las pruebas, se indujo daño a dos insertos de carburo para simular distintos niveles de desgaste. Se utilizaron tres insertos: el primero (Figura 4.1) no presentaba daño alguno, el segundo (Figura 4.2) presentaba un daño ligero en la punta y el tercero (Figura 4.3) presentaba un nivel de daño mayor sobre punta y cara. Es posible observar en las figuras siguientes la acumulación de material en la parte superior y la punta de los insertos, este fenómeno podría tener efecto en los resultados de los análisis a las señales obtenidas.



Figura 4.1. Detalle del inserto "sano" posterior a las pruebas.



Figura 4.2. Detalle del inserto con desgaste "medio" (desgaste de punta). Puede observarse el nivel de desgaste debido al material acumulado (aluminio) señalado en la figura.



Figura 4.3Detalle del inserto "dañado" (desgaste de punta y cara). Puede observarse el nivel de desgaste debido al material acumulado (aluminio) señalado en la figura.

4.2 Pruebas con el torno CNC.

4.2.1 Programación de las rutinas de corte.

En la Figura 4.4 se muestra un ejemplo de código utilizado para la programación del torno CNC para realizar una rutina de desbaste con una profundidad total de 1.5mm.

```
M04 S1000
M05
G00 X45.57 Z85.00
G01 X37.57 Z85.00
G01 X37.57 Z71.188 F0.1
G00 X45.57 Z71.188
G00 X45.57 Z85.00
G01 X34.57 Z85.00
G01 X34.57 Z71.188 F0.1
G00 X45.57 Z71.188
G00 X45.57 Z85.00
G01 X31.57 Z85.00
G01 X31.57 Z71.188 F0.1
G00 X45.57 Z71.188
G00 X45.57 Z85.00
M30
```

Figura 4.4. Ejemplo de código para programar la rutina de corte en el torno CNC.

En la Figura 4.5 se muestra la secuencia de puntos programados para la realización de las trayectorias de corte.

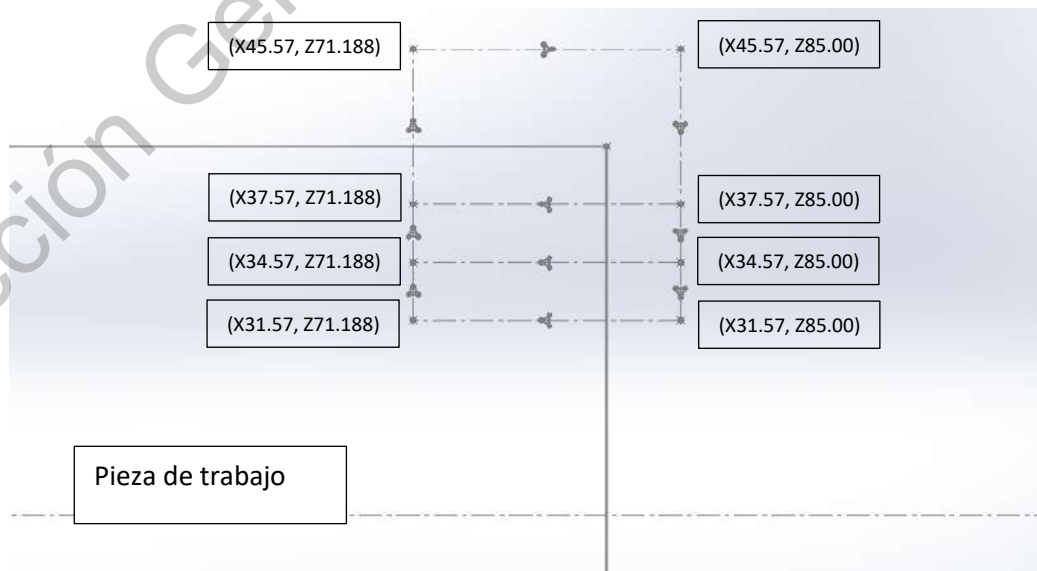


Figura 4.5. Ejemplo de trayectoria a seguir del código de la Figura 4.4.

4.2.2 Barras maquinadas.

A continuación, se presentan fotografías de los resultados de las pruebas de corte realizadas a 15 barras de aluminio 6061 según los parámetros de la matriz de pruebas mostrada en la Tabla 3.2.

En la figura 4.6 se muestran las barras maquinadas a una profundidad total de 0.25mm, teniendo de izquierda a derecha la barra maquinada con el inserto “sano”, seguida por la barra maquinada con el inserto con desgaste medio y, finalmente, la barra maquinada con el inserto “dañado”. En esta figura es posible apreciar las diferencias en el acabado debido al estado de las herramientas: el acabado de la fotografía a la derecha presenta muchas irregularidades, la barra central presenta un acabado con más regular y la barra de la izquierda presenta un acabado completamente liso.



Figura 4.6. Barras maquinadas a 0.25mm de profundidad. De izquierda a derecha: herramienta "sana", herramienta con desgaste "medio" y herramienta "dañada".

En la figura 4.7 se muestran las barras maquinadas con una profundidad total de 0.75mm, teniendo, de izquierda a derecha, el resultado del maquinado con el inserto “sano”, el inserto con desgaste medio y el inserto “dañado”. En esta figura se observan de forma más claras las dificultades de corte con la herramienta dañada debido al material que quedó acumulado en la barra de la parte derecha de la figura.



Figura 4.7. Barras maquinadas a 0.75mm de profundidad. De izquierda a derecha: herramienta "sana", herramienta con desgaste "medio" y herramienta "dañada".

La figura 4.8 muestra los resultados de las pruebas realizadas con una profundidad total de 1.25mm. Es posible notar las diferencias causadas por el desgaste de las herramientas: la herramienta "sana" (izquierda) dejó un acabado pulcro, el inserto con desgaste "medio" (centro) generó ligeras irregularidades en la superficie, mientras el inserto "dañado" (derecha) dejó un acabado irregular y material acumulado en la barra.



Figura 4.8. Barras maquinadas a 1.25mm de profundidad. De izquierda a derecha: herramienta "sana", herramienta con desgaste "medio" y herramienta "dañada".

Los resultados del maquinado a 1.75mm se muestran en la figura 4.9. La tendencia señalada con las pruebas anteriores se mantiene: acabado liso para la herramienta "sana" (izquierda), acabado con pequeñas irregularidades para la herramienta con desgaste "medio" (centro) y un acabado irregular para la herramienta "dañada".



Figura 4.9. Barras maquinadas a 1.75mm de profundidad. De izquierda a derecha: herramienta "sana", herramienta con desgaste "medio" y herramienta "dañada".

En la figura 4.10 se muestran las barras maquinadas a una profundidad total de 2.25mm, teniendo de izquierda a derecha la barra maquinada con el inserto "sano", seguida por la barra maquinada con el inserto con desgaste medio y finalmente la barra maquinada con el inserto "dañado". En esta figura las diferencias entre el resultado con el inserto "sano" y el de daño "medio" son ligeramente más evidentes, pudiendo observarse pequeñas imperfecciones en el borde de la pieza maquinada.



Figura 4.10. Barras maquinadas a 2.25mm de profundidad. De izquierda a derecha: herramienta "sana", herramienta con desgaste "medio" y herramienta "dañada".

4.3 Análisis de las señales obtenidas.

Como se mencionó en el capítulo anterior, el primer paso fue el acondicionamiento de las señales para eliminar la señal de corriente continua debido a los sensores. A continuación, se muestran las señales obtenidas para el corte con la herramienta en estado "dañado" a una profundidad de corte de 1.25mm. La Figura 4.11 corresponde a la señal del sensor 1, el cual mide una combinación de flujo axial y radial. En la Figura 4.12 se muestra la señal capturada por el sensor 2, el cual detecta el flujo en dirección radial. De igual forma, la Figura 4.13 muestra

la señal correspondiente al flujo axial, capturado por el sensor 3. En las tres figuras se tiene voltaje en el eje vertical y segundos en el eje horizontal, el pico que se aprecia en cada una de las figuras corresponde al final del ciclo de corte.

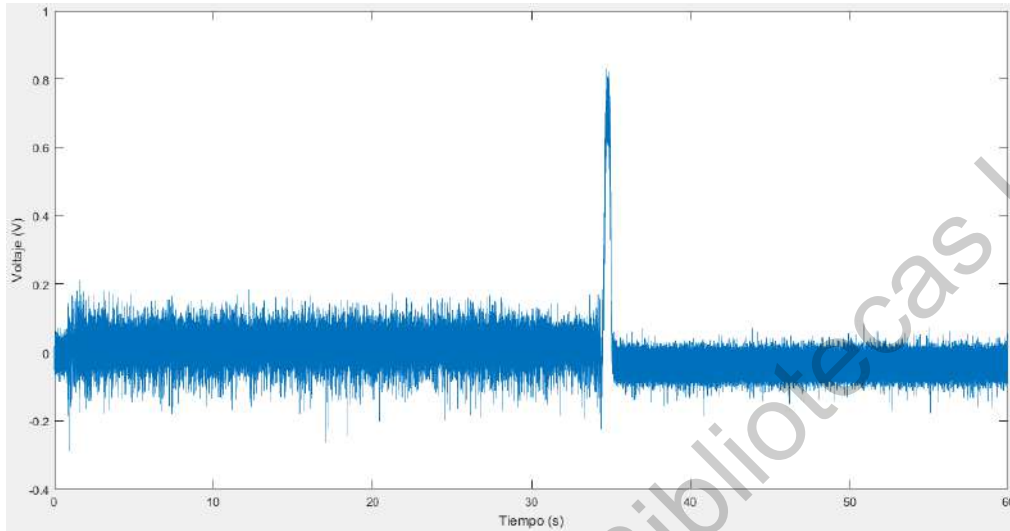


Figura 4.11. Señal acondicionada del sensor 1 (combinación de flujo axial y radial).

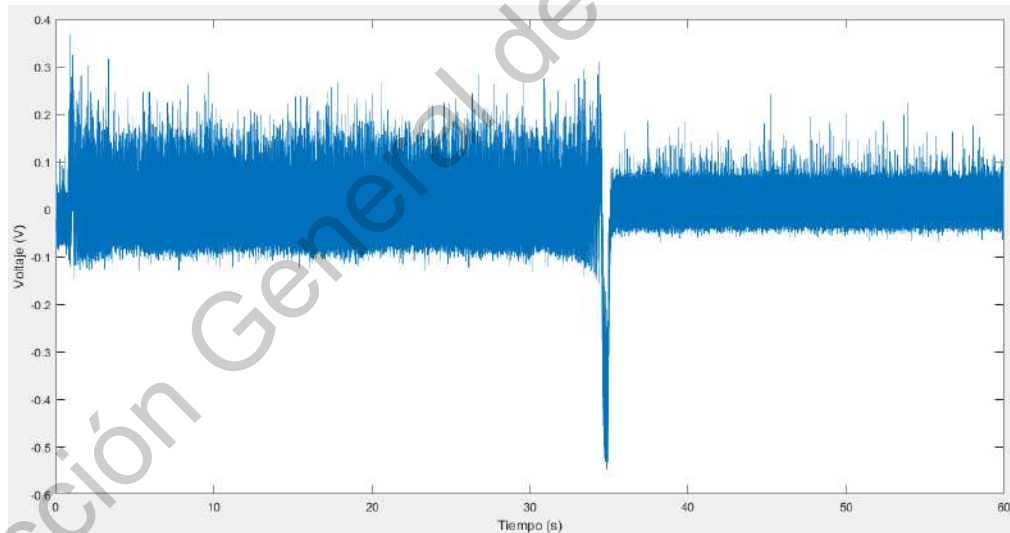


Figura 4.12. Señal acondicionada del sensor 2 (flujo radial).

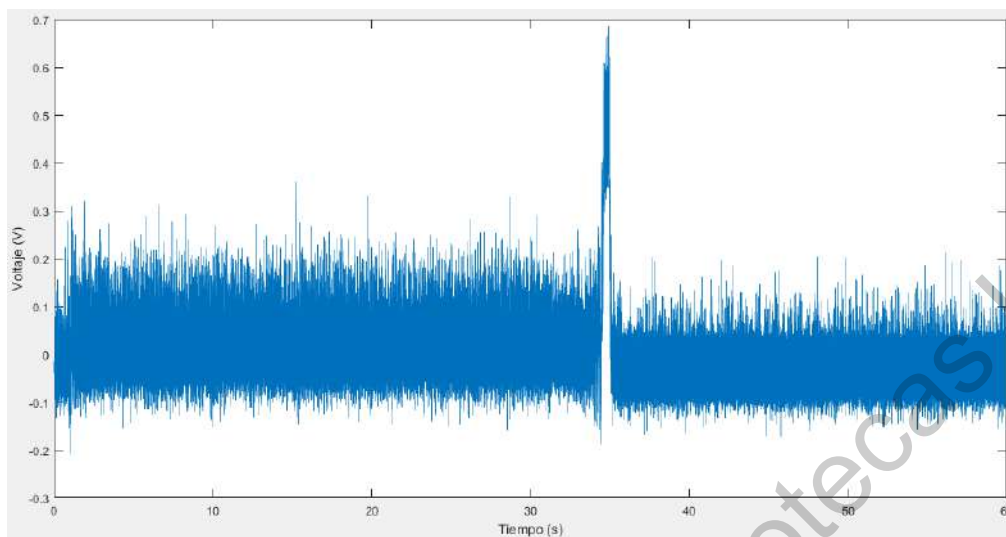


Figura 4.13. Señal acondicionada del sensor 3 (flujo axial).

Posteriormente se realizó la descomposición mediante la DWT para identificar las componentes que muestren mejor el comportamiento. Al revisar las gráficas de los distintos niveles se pudo notar que el nivel cinco de descomposición mostraba de forma clara los tres cortes realizados en cada una de las pruebas, como se muestra en las Figuras 4.14-4.16. Esto permite identificar las componentes de interés para el cálculo de los parámetros estadísticos.

En la Figura 4.14, que corresponde al sensor 1, se pueden apreciar las perturbaciones (señaladas mediante círculos rojos) en la combinación de los campos axial y radial debido a los tres cortes realizados. En la Figura 4.15, correspondiente al sensor 2, se muestran las perturbaciones detectadas en el flujo radial. De igual forma, la Figura 4.16 muestra las variaciones correspondientes al flujo axial, medido con el sensor 3. En cada una de estas figuras se muestra primero la señal original después de ser filtrada para eliminar el ruido presente en la señal original usando un filtro digital pasa bajos tipo Butterworth de orden 10, después se muestran distintos niveles de descomposición de la señal iniciando en nivel ocho y terminando en nivel 3. Es posible apreciar que con la combinación de flujos del sensor 1 se logra diferenciar con mayor facilidad las perturbaciones por el proceso de desbaste.

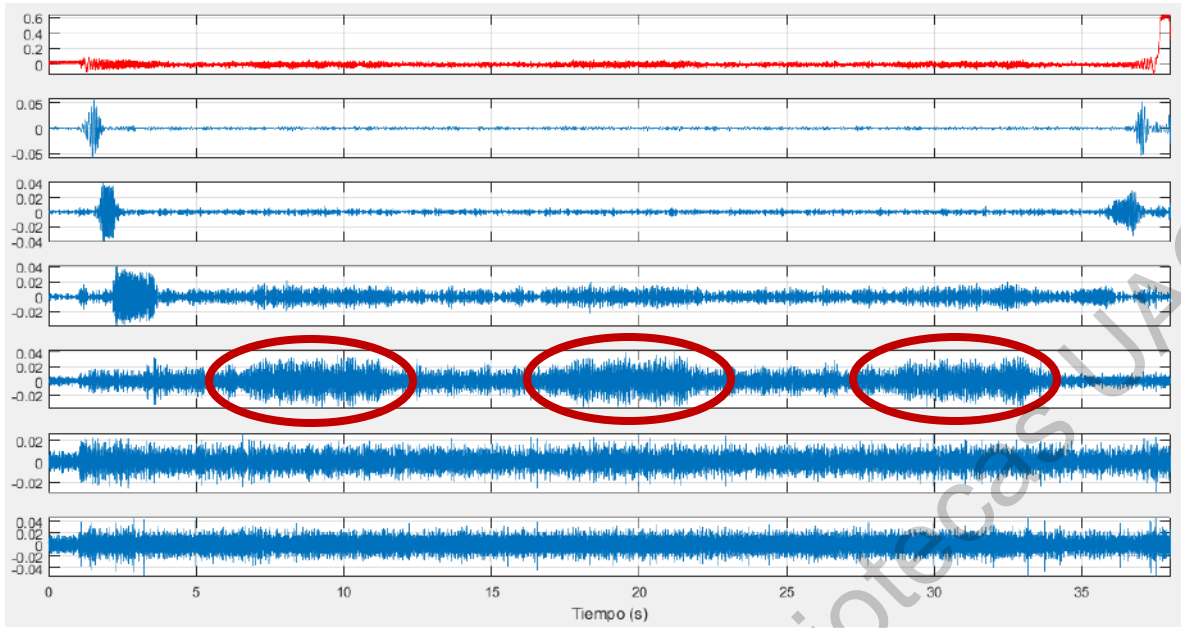


Figura 4.14. Señales correspondientes al sensor 1 (combinación de flujo axial y radial). Se pueden apreciar las perturbaciones por el corte de la herramienta en las zonas señaladas.

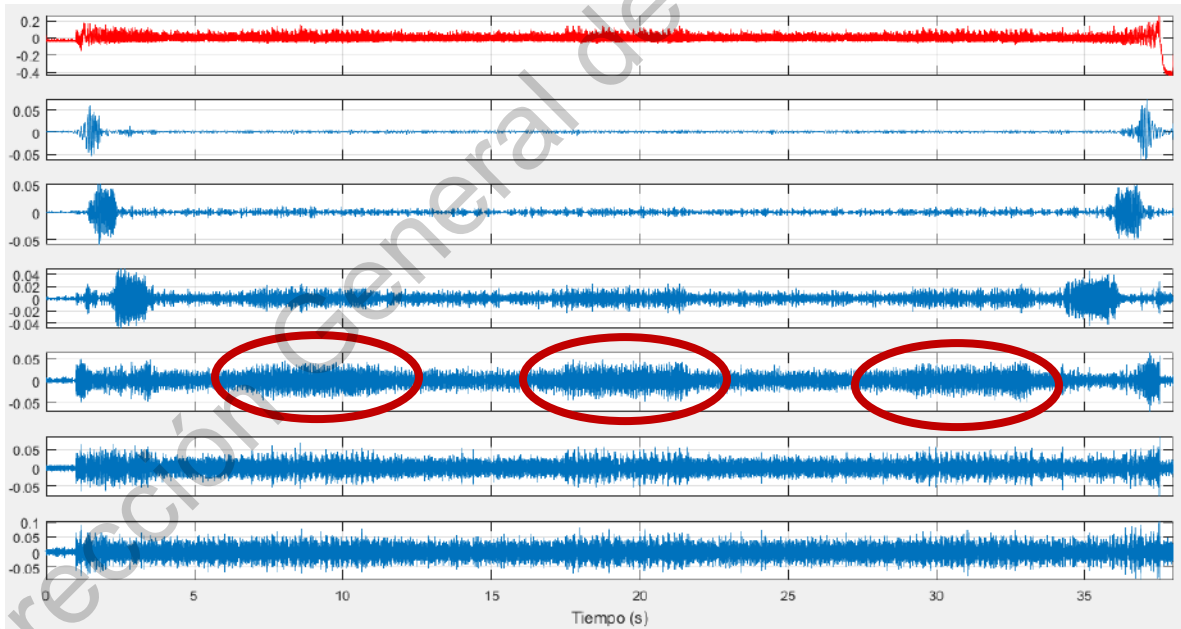


Figura 4.15. Señales correspondientes al sensor 2 (flujo radial). Se pueden apreciar las perturbaciones por el corte de la herramienta en las zonas señaladas.

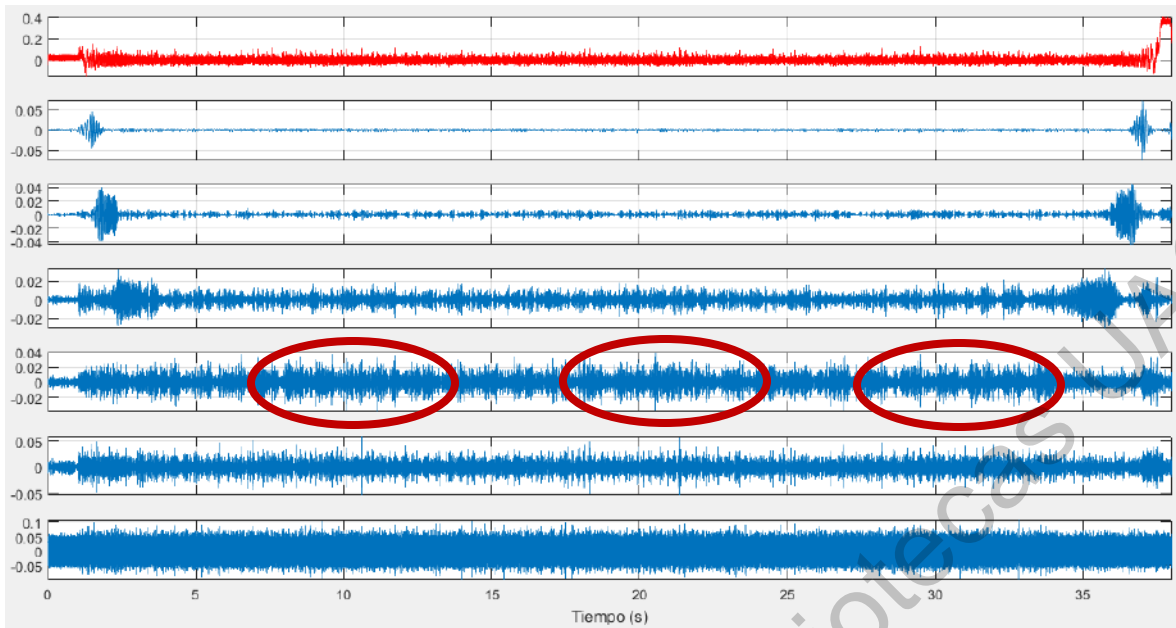


Figura 4.16. Señales correspondientes al sensor 3 (flujo axial). Se pueden apreciar las perturbaciones por el corte de la herramienta en las zonas señaladas.

Como se mencionó en el capítulo anterior, el parámetro de energía permitió apreciar una variación entre las señales de cada corte respecto a los niveles de desgaste. En las Figuras 4.17-4.19 se muestra el nivel de energía γ_{DWT} para cada herramienta y profundidad de corte según el sensor.

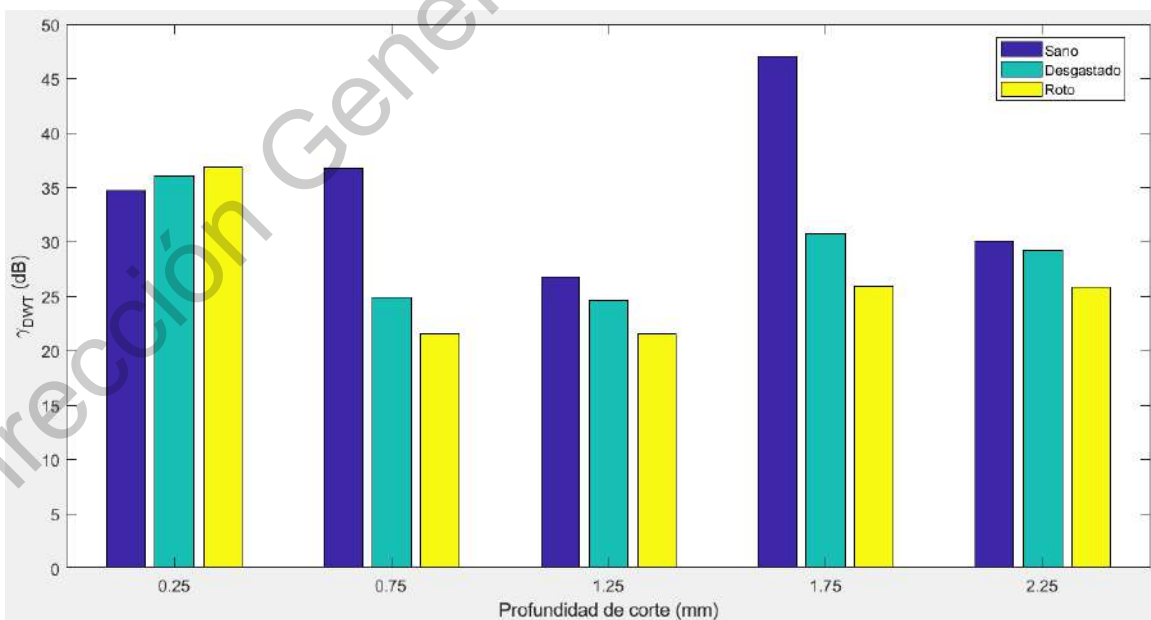


Figura 4.17. Gráfica de barras que muestra los niveles de energía para las distintas profundidades de corte para cada una de las herramientas con el sensor 1.

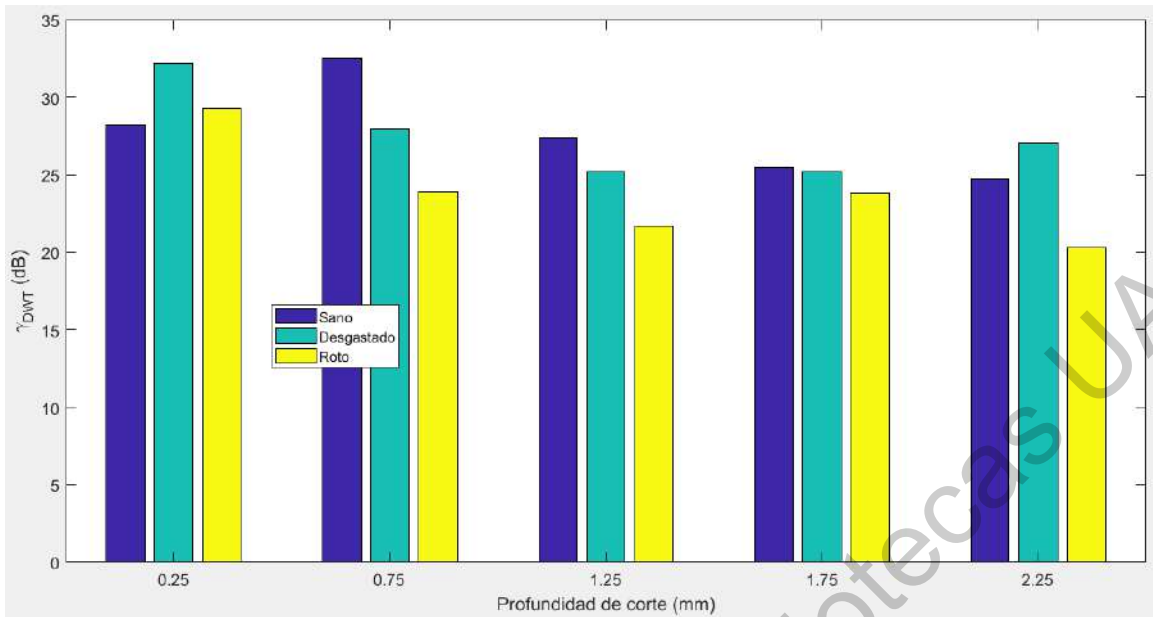


Figura 4.18. Gráfica de barras que muestra los niveles de energía para las distintas profundidades de corte para cada una de las herramientas con el sensor 2.

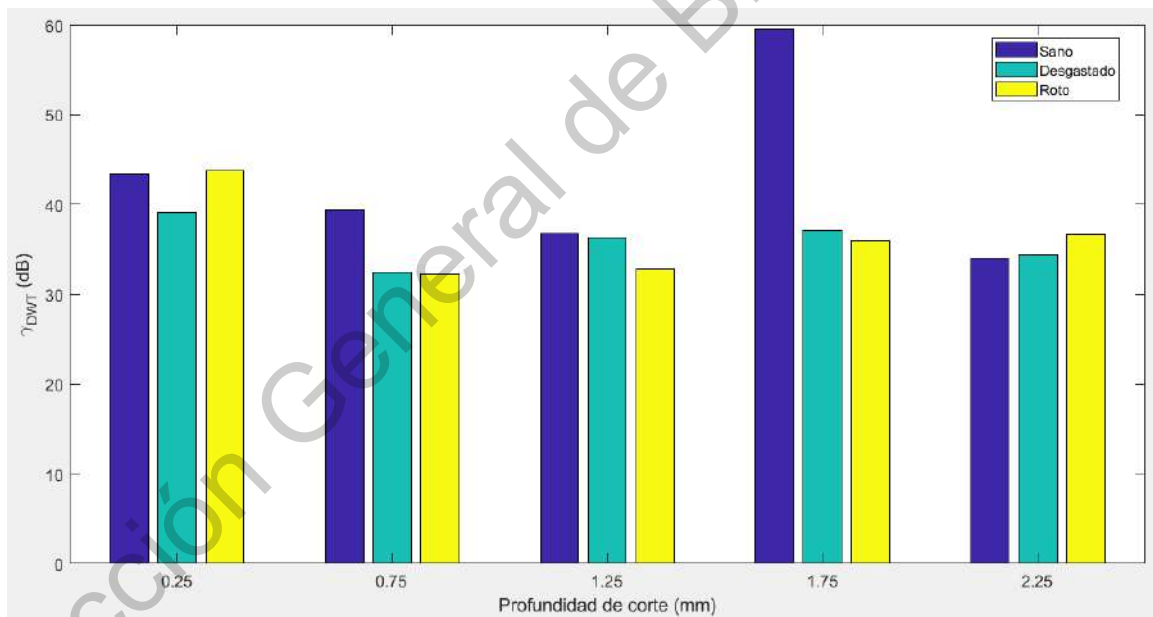


Figura 4.19. Gráfica de barras que muestra los niveles de energía para las distintas profundidades de corte para cada una de las herramientas con el sensor 3.

Como se puede apreciar, existen variaciones entre los niveles de energía registrados para cada corte. En la mayoría de los casos, la herramienta “sana” muestra un nivel de energía mayor a la herramienta en estado “dañado”; por otro lado, la herramienta con un desgaste “medio” muestra una tendencia a la

disminución del indicador al aumentar la profundidad de corte, encontrándose en un nivel intermedio entre los otros dos insertos. Cabe recordar que, a mayor magnitud del indicador, menor nivel de energía en la señal.

Es apreciable que los sensores 1 (Figura 4.17, combinación de flujo axial y radial) y 2 (Figura 4.18, radial) muestran una mayor diferenciación en los niveles de energía para cada herramienta.

4.4 Análisis de profundidad de corte contra desgaste.

Las Figuras 4.17-4.19 muestran los distintos niveles de energía para las señales obtenidas según la profundidad de corte. Es posible observar, como se mencionó anteriormente, que los niveles de γ_{DWT} tienden a ser mayores cuando la herramienta se encuentra en mejor estado, disminuyendo a medida que el desgaste incrementa, sin que la profundidad total de corte tenga un impacto significativo en esta tendencia.

En la Figura 4.18 se puede observar que para las lecturas a 0.75, 1.25 y 1.75mm, la tendencia es más controlada. Por otro lado, en las Figuras 4.17 y 4.19 se aprecia un incremento mayor en el indicador para la herramienta “sana” e incrementos menores para las demás herramientas a una profundidad de 1.75mm, al igual que cambios menos significativos en los indicadores de las señales en 0.75 y 1.25mm.

Considerando ahora los resultados a profundidades de 0.25 y 2.25 mm en las Figuras 4.17-4.19, es posible observar que estas señales no siguen la tendencia mencionada. Esto podría ser causado por el estado de los insertos: para las operaciones a 0.25mm los insertos presentaban un nivel de desgaste que pudo causar que las operaciones no se realizaran de la mejor manera, algo esperable con una herramienta dañada; por otro lado, para los maquinados a 2.25mm los insertos presentaban material acumulado en la zona dañada, lo que pudo influir en la forma de en que se realizaron los desbastes.

4.5 Conclusiones.

A partir de los resultados obtenidos con el análisis, se puede observar que existe una relación entre el nivel de energía de las señales y el estado de la herramienta. En las figuras 4.17-4.19 se puede observar como varían las lecturas, no solo con respecto al estado del inserto y la profundidad de corte, sino respecto al flujo que mide cada sensor. Es evidente que el sensor 1 (Figura 4.17), que mide una combinación de flujo axial y radial, muestra diferencias más notorias y de forma constante cuando se compara con las mediciones de flujo radial y axial por separado.

De igual forma es necesario tomar en cuenta una irregularidad ocurrida durante las pruebas de corte a 0.25mm de profundidad: debido a que se trataba de la primera prueba y por el nivel de daño presentado por las herramientas “desgastada” y “dañada”, los cortes con estas dos herramientas fueron irregulares, tanto así que la herramienta “dañada” realizó solamente dos desbastes a la pieza. En la sección 4.1 se mencionó que el estado de los insertos podría influir en los resultados, y en las figuras 4.2 y 4.3 se puede apreciar el material que se acumuló en las herramientas de corte, el cual, en las pruebas siguientes, permitió que las herramientas realizaran cortes de mejor forma ya que eso mejoró la geometría de la herramienta. No obstante, si consideramos un entorno de producción continua, este sería un comportamiento esperado.

Con esto, es posible concluir que existe una relación entre desgaste en los insertos y el flujo magnético disperso en el husillo de un torno CNC, lo cual, con el análisis realizado, permite obtener indicadores que den información sobre los insertos para así poder conocer el estado de dichas herramientas y que se puedan tomar decisiones sobre su uso.

Esto permite la generación de una nueva técnica de estudio para el fenómeno del desgaste en herramientas. Más estudios podrían ser realizados variando distintos parámetros de corte para conocer el comportamiento del flujo bajo condiciones diferentes y perfeccionar este método de análisis, lo que permitiría una futura implementación *online* que permitiera conocer las condiciones durante el proceso y una posible reducción de incidentes durante el maquinado que se

reflejaría en una probable reducción de costos y tiempo de paro dentro de las industrias.

De igual forma, el trabajo realizado dejó como resultado la publicación de un artículo con los resultados obtenidos en la investigación, el cual se puede consultar en el Apéndice I.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Apéndice I.

Publicación del artículo “STFT-based induction motor stray flux analysis for the monitoring of cutting tool wearing in CNC machines” en el congreso “IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society”, llevado a cabo del 18 al 21 de octubre de 2020 en Singapur.

Dirección General de Bibliotecas UNQ

Referencias/Bibliografía.

6061 (AlMg1SiCu, 3.3214, H20, A96061) Aluminum :: MakeltFrom.com. (2020, 30 mayo). MakeltFrom.com. <https://www.makeitfrom.com/material-properties/6061-AlMg1SiCu-3.3214-H20-A96061-Aluminum>

Allegro MicroSystems - A1324-A1325-A1326: Low Noise, Linear Hall Effect Sensor ICs with Analog Output. (s. f.). A1324, A1325, A1326: Low Noise, Linear Hall Effect Sensor ICs with Analog Output. Recuperado 4 de junio de 2020 de: <https://www.allegromicro.com/en/Products/Sense/Linear-and-Angular-Position/Linear-Position-Sensor-ICs/A1324-5-6>

Antonino-Daviu, J., Razik, H., Quijano-Lopez, A., & Climente-Alarcon, V. (2017, October). Detection of rotor faults via transient analysis of the external magnetic field. In IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (pp. 3815-3821). IEEE.

ATIS Telecom Glossary. (s. f.). ATIS Telecom Glossary. Recuperado 3 de noviembre de 2020, de <https://web.archive.org/web/20080628071722/http://www.atis.org/glossary/definicion.aspx?id=2773>

Capolino, G. A., Romary, R., Hénao, H., & Pusca, R. (2019, April). State of the Art on Stray Flux Analysis in Faulted Electrical Machines. In 2019 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD) (Vol. 1, pp. 181-187). IEEE.

cncmanual.com. (s. f.). Fanuc Serie 0i Mate TC MANUAL DEL OPERADOR B-64134SP/01 pdf - CNC Manual. Recuperado 22 de enero de 2021, de <http://cncmanual.com/fanuc-serie-0i-mate-tc-manual-del-operador-b-64134sp01/>

Deingenierias.com. (2020, 24 julio). Velocidad de corte avance y parámetros de torneado. De Ingenierías. <https://deingenierias.com/torno/velocidad-de-corte-avance-y-parametros-de-torneado/>

Frosini, L., Harlişca, C., & Szabó, L. (2014). Induction machine bearing fault detection by means of statistical processing of the stray flux measurement. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(3), 1846-1854.

Ghosh, S., Naskar, S. K., & Mandal, N. K. (2018). Estimation of residual life of a cutting tool used in a machining process. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 192, p. 01017). EDP Sciences.

Haraguchi, N., Cheng, C. F. C., & Smeets, E. (2017). The importance of manufacturing in economic development: Has this changed? *World Development*, 93, 293-315.

Inserto Triangular #TCMT3(2.5)1 C2 TERRA CARBIDE. (s. f.). Inserto Triangular #TCMT3(2.5)1 C2 TERRA CARBIDE. Recuperado 4 de junio de 2020, de <https://www.travers.com.mx/insertos-para-torneado/inserto-triangular-tcmt3-2-5-1-c2-terra-carbide-22--100--030>

Jáuregui, J. C., Reséndiz, J. R., Thenozhi, S., Szalay, T., Jacsó, Á., & Takács, M. (2018). Frequency and time-frequency analysis of cutting force and vibration signals for tool condition monitoring. *IEEE Access*, 6, 6400-6410.

Jones, Alan R. (2018). *Probability, Statistics and Other Frightening Stuff*. Routledge. Página: 48.

Kalpajian, S.; Schmid, S.R. (2008). *Manufactura ingeniería y tecnología*, 5 edición; México, D.F.: Pearson Educación. Páginas: 626-634, 674, 677, 686-687, 691-693.

Kuphaldt, T. R. (2020, 3 marzo). Measurements of AC Magnitude. *Basic AC Theory | Electronics Textbook*. <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-1/measurements-ac-magnitude/>

Liu, Z., Tian, G., Cao, W., Dai, X., Shaw, B., & Lambert, R. (2017). Non-invasive load monitoring of induction motor drives using magnetic flux sensors. *IET Power Electronics*, 10(2), 189-195.

Luo, B., Wang, H., Liu, H., Li, B., & Peng, F. (2018). Early fault detection of machine tools based on deep learning and dynamic identification. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(1), 509-518.

MathWorks. (s. f.). Skewness - MATLAB skewness. Recuperado 4 de agosto de 2020, de <https://www.mathworks.com/help/stats/skewness.html>

MathWorks. (s. f.-a). Kurtosis - MATLAB kurtosis. Recuperado 4 de agosto de 2020, de <https://www.mathworks.com/help/stats/kurtosis.html>

Martínez, C., & Ediciones, E. (2012). *Estadística y muestreo - 13ra Edición*. Ecoe Ediciones. Páginas: 167, 170.

Moreno-Gil, J. S. (1998). *Procedimientos estadísticos*. ESIC. Página: 73.

Murray, S. (2010). *Estadística: Serie Schaum (4.a ed.)*. McGraw-Hill. Página: 125.

Park, Y., Yang, C., Kim, J., Kim, H., Lee, S. B., Gyftakis, K. N., ... & Capolino, G. A. (2018). Stray flux monitoring for reliable detection of rotor faults under the influence of rotor axial air ducts. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(10), 7561-7570.

Peak-to-average power ratio of signals - labAlive experiment. (s. f.). labAlive. Recuperado 3 de noviembre de 2020, de <https://www.etti.unibw.de/labalive/experiment/papr/>

Polikar, R. (1996). *The wavelet tutorial*.

Polikar, R. (1999). *The story of wavelets. Physics and modern topics in mechanical and electrical engineering*, 192-197.

Power Meter Tutorials - Background | Yokogawa Test & Measurement Corporation. (s. f.). Yokogawa Test & Measurement Corporation. Recuperado 3 de noviembre de 2020, de <https://tmi.yokogawa.com/library/resources/training-modules/power-meter-tutorials-background/>

Rajendra, B. R., & Bhaskar, S. V. (2013). Condition monitoring of gear box by using motor current signature analysis. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 3(8), 563-568.

Ramirez-Nunez, J. A., Antonino-Daviu, J. A., Climente-Alarcón, V., Quijano-López, A., Razik, H., Osornio-Rios, R. A., & Romero-Troncoso, R. D. J. (2018). Evaluation of the detectability of electromechanical faults in induction motors via transient analysis of the stray flux. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(5), 4324-4332.

Romary, R., Pusca, R., Lecoite, J. P., & Brudny, J. F. (2013, March). Electrical machines fault diagnosis by stray flux analysis. In *2013 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)* (pp. 247-256). IEEE.

Romary, R., Roger, D., & Brudny, J.-F. (2009). Analytical computation of an AC machine external magnetic field. *The European Physical Journal Applied Physics*, 47(3), 31102. doi:10.1051/epjap/2009102.

Ross, S. M. (2007). *Introducción a la estadística*. Reverté. Página: 70.

Shannon, C. E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, 27(3), 379–423.

Sevilla-Camacho, P. Y., Herrera-Ruiz, G., Robles-Ocampo, J. B., & Jáuregui-Correa, J. C. (2011). Tool breakage detection in CNC high-speed milling based in feed-motor current signals. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53(9-12), 1141-1148.

SimpleLink™ MSP432P401R high-precision ADC LaunchPad™ Development Kit. (s. f.). Texas Instruments. Recuperado 4 de julio de 2020, de <https://www.ti.com/tool/MSP-EXP432P401R>

Thakre, A. A., Lad, A. V., & Mala, K. (2019). Measurements of Tool Wear Parameters Using Machine Vision System. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2019.

Thompson, Sylvanus P. (1965). *Calculus Made Easy*. Macmillan International Higher Education. Página: 185.

Trejo-Hernandez, M., Osornio-Rios, R. A., Romero-Troncoso, R. D. J., Rodriguez-Donate, C., Dominguez-Gonzalez, A., & Herrera-Ruiz, G. (2010). FPGA-based fused smart-sensor for tool-wear area quantitative estimation in CNC machine inserts. *Sensors*, 10(4), 3373-3388.

Triola, M. F., Ramirez, R. H., & Ayala, L. E. P. (2012). *Estadística (10 Pap/Cdr ed.)*. Prentice Hall College Div. Páginas: 113, 114, 130.

Weisstein, E. W. (s. f.). Fast Fourier Transform -- from Wolfram MathWorld. Wolfram MathWorld. Recuperado 3 de noviembre de 2020, de <https://mathworld.wolfram.com/FastFourierTransform.html>

Weisstein, E. W. (s. f.). Root-Mean-Square -- from Wolfram MathWorld. Wolfram MathWorld. Recuperado 3 de noviembre de 2020, de <https://mathworld.wolfram.com/Root-Mean-Square.html>

Zamudio-Ramirez, I., Osornio-Rios, R. A., Trejo-Hernandez, M., Romero-Troncoso, R. D. J., & Antonino-Daviu, J. A. (2019). Smart-Sensors to Estimate Insulation Health in Induction Motors via Analysis of Stray Flux. *Energies*, 12(9), 1658.