



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Doctorado en Ingeniería

Monitoreo, análisis y modelado fenomenológico del desgaste de la herramienta bajo condiciones de corte variables en torno CNC

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de Doctor en Ingeniería

Presenta:

M.C. Miguel Trejo Hernández

Dirigido por:

Dr. Aurelio Domínguez González

SINODALES

Dr. Aurelio Domínguez González

Presidente

Firma

Dr. Gilberto Herrera Ruíz

Secretario

Firma

Dr. René de J. Romero Troncoso

Vocal

Firma

Dr. Roque Alfredo Osornio Rios

Suplente

Firma

Dr. Juan Primo Benitez Rangel

Suplente

Firma

Dr. Gilberto Herrera Ruiz

Director de la Facultad

Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval

Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Junio 2010
México

Resumen

Los procesos de manufactura hoy en día son cada vez más importantes en el sector industrial, tanto para empresas dedicadas a esta área como para empresas que indirectamente se benefician de la manufactura. El estudio del desgaste de la herramienta es un problema importante debido al costo que representa en los procesos de remoción de material. En la presente investigación, se muestra que es posible obtener buenos resultados en cuanto al monitoreo del estado de la herramienta, aplicando una metodología simple que, a partir de pruebas experimentales y su análisis, se generan modelos empíricos del fenómeno de desgaste en los insertos, que permiten obtener y, más aún, mejorar la estimación cuantitativa de dicho desgaste. Esto es posible debido a la fusión de datos de corriente y vibración generados en un proceso de torneado, los cuales son relacionados a través de una función de peso que, además, incluye los efectos de los parámetros de maquinado como el avance y la profundidad de corte. Finalmente, el uso de nuevas tecnologías, permite la implementación de la metodología propuesta en un sensor inteligente de bajo costo basado en FPGA (Field Programmable Gates Array).

(Palabras clave: Desgaste de herramientas, estudio experimental, modelo empírico, smart-sensor, FPGA)

Summary

Today manufacturing processes are increasingly more important in the industrial sector for companies that work in this area, as well as for companies that indirectly benefit from manufacturing. The importance of tool wear study is due to the cost represented by the material remotion. In this research study it is shown that it is possible to obtain good results related to the monitoring of the condition of cutting tool by applying a simple methodology which, based on experimental tests and their analysis, to create empirical models of the insert wear phenomenon. This allows to obtain and to improve the quantitative tool wear estimation, by the fusion of current and vibration data created in a turning process. The data are related by means of a weighting function which also includes the effects of machining parameters such as the feed rate and depth of cut. Finally, the use of new technologies, such as FPGA (Field Programmable Gates Array), makes possible the implementation of the proposed methodology in a low cost smart-sensor.

(Keywords: Tool wear, experimental study, empirical model, smart-sensor, FPGA)

Dedicatorias

A mis padres y hermanos.

Agradecimientos

A las personas que directa o indirectamente formaron parte en el desarrollo de esta investigación y que a su vez me acompañaron durante mi estancia en la Facultad de Ingeniería.

Agradezco a mi asesor, Dr. Aurelio Domínguez por invitarme a formar parte del posgrado y al Dr. Gilberto Herrera Ruiz por su apoyo incondicional. Un agradecimiento muy especial al Dr. Roque A. Osornio Rios y al Dr. René de J. Romero Troncoso por sus enseñanzas, su tiempo dedicado hacia mí e invaluable apoyo brindados en la última etapa de este periodo. Le agradezco a Juan el haberme dado ánimo en todo momento y al grupo HSPdigital por su apoyo y por la convivencia que tuve con ellos.

A mi novia, por sus consejos y sobre todo por darme ánimo para concluir este gran reto.

Finalmente agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada 105603 y a su vez al soporte mediante el proyecto SEP-CONACyT 36808.

Índice

	Página
Resumen.....	ii
Summary.....	iii
Dedicatorias.....	iv
Agradecimientos.....	v
Índice	vi
Índice de Tablas.....	viii
Índice de Figuras	ix
Capítulo I.....	1
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Hipótesis y Objetivo general	4
1.2.1. Objetivos particulares	5
1.3. Justificación.....	5
1.4. Planteamiento general.....	7
Capítulo II.....	8
2. Revisión de literatura	8
2.1. Máquinas herramienta CNC.....	8
2.2. Mecánica del proceso de corte en torno	9
2.2.1. Corte oblicuo.....	11
2.2.2. Corte ortogonal	12
2.3. Cálculo de los parámetros de corte.....	13
2.4. Tipos de herramienta de corte	13
2.5. Vida de las herramientas.....	17
2.6. Desgaste de la herramienta de corte	17
2.6.1. Desgaste de Flanco	18
2.6.2. Desgaste de Cráter	18
2.6.3. Otros tipos de desgaste	19
2.7. Monitoreo del desgaste de las herramientas.....	20

2.7.1.	Aproximaciones en el monitoreo del desgaste de la herramienta.....	20
2.8.	Smart-sensors	21
2.9.	Procesamiento de señales	22
2.9.1.	Ventaneo en tiempo	23
2.9.2.	Valor RMS	23
2.9.3.	Filtrado digital.....	24
2.10.	FPGA y procesamiento de señales en hardware	24
Capítulo III.....		26
3.	Metodología experimental.....	26
3.1.	Condiciones de corte	26
3.2.	Área de desgaste de flanco y procesamiento de imágenes	27
3.3.	Caso de estudio 1: Efecto del desgaste de la herramienta en la corriente.	31
3.4.	Caso de estudio 2: Variación en las condiciones de corte.....	35
3.4.1.	Metodología propuesta	36
3.4.2.	Procesamiento de las señales de corriente y vibración	38
3.4.3.	Arreglo experimental.....	39
3.4.4.	Parámetros de la función de peso	41
3.4.5.	Los parámetros de maquinado y la función de peso.....	42
Capítulo IV		47
4.	Resultados y discusión	47
4.1.	Caso de estudio 1: Efecto del desgaste y cambio en el diámetro de la pieza en la corriente.....	47
4.2.	Caso de estudio 2: Variación en las condiciones de corte.....	49
4.2.1.	Estimación del área de desgaste de flanco basada en corriente.....	50
4.2.2.	Estimación del área de desgaste de flanco basada en vibración.....	51
4.2.3.	Estimación del área de desgaste de flanco basada en corriente y vibración.....	52
5.	Conclusiones	55
6.	Prospectivas.....	57
Bibliografía.....		58
Apéndice A		62
Apéndice B		63

Índice de Tablas

Tabla	Página
3.1. Recomendaciones generales para operaciones de torneado	26
3.2. Condiciones de corte en la experimentación.	45
4.1. Errores absolutos para los parámetros en forma separada y su fusión.	52
4.2. Errores de estimación del área de desgaste de flanco por el smart-sensor para distintos experimentos de maquinado.	54

Índice de Figuras

Figura	Página
1.1. Diagrama a bloques del planteamiento general.....	7
2.1. Torno CNC típico.....	9
2.2. Geometría del proceso de torneado.....	9
2.3. Operaciones de corte que pueden realizarse en un torno.....	10
2.4. Geometría del corte oblicuo.....	12
2.5. Geometría del corte ortogonal.....	12
2.6. Recubrimientos de varias fases sobre un sustrato de carburo de tungsteno.....	15
2.7. (a) Formas de insertos. (b) Resistencia relativa de arista y tendencia al despostillamiento y rotura de insertos de diversas formas.....	16
2.8. Preparación del filo de insertos para mejorar su resistencia.....	16
2.9. Curvas de vida de la herramienta, se muestra la variación del desgaste de flanco y el tiempo de corte a diferentes velocidades de corte. (Altintas, 2000).....	17
2.10. a) Tipos de desgaste y b) Desgaste de flanco y área de desgaste de flanco A_f	18
2.11. Funcionalidades de los distintos tipos de sensores.....	22
3.1. Equipo de microscopia.....	27
3.2. Obtención del contorno del área de desgaste.....	28
3.3. Área de desgaste totalmente rellenada.....	29
3.4. Cálculo del área de desgaste de flanco mediante el software.....	30
3.4. Diagrama a bloques de la metodología.....	31
3.5. Trayectoria de maquinado para el ciclo de cilindrado.....	32
3.6. Tarjeta de adquisición de datos.....	33
3.7. Ventaneo en tiempo de la señal de corriente a) señal original, b) ventana y c) señal ventaneada en las secciones s1 y s3.....	33
3.8. Aplicación desarrollada en Matlab para el análisis de señales.....	35
3.9. Diagrama a bloques del smart-sensor propuesto.....	36

3.10. Diagrama a bloques de la unidad HSP basada en FPGA.	37
3.11. Procesamiento de señales de corriente y vibración.	39
3.12. Arreglo experimental. a) Torno CNC, b).Acelerómetro y pieza de trabajo, c) Servoamplificador y d) Unidad de procesamiento de señales basado en FPGA.....	40
3.13. Acelerómetro a) vista frontal y trasera del PCB b) Diseño del encapsulado de aluminio para cierre hermético.	41
3.14. Exploración de los parámetros de la función de peso.	42
3.15. Efecto de los factores de a) escalamiento K_C debido a la profundidad de corte b) escalamiento K_S también debido a la profundidad de corte y c) de desplazamiento K_D debido al avance.	44
3.16. Trayectoria de maquinado del refrentado cónico.	46
4.1. Evaluación del modelo polinomial para piezas con diámetros de a) 36mm, b) 34 mm, c) 32 mm y d) 30mm.	48
4.2. Errores absolutos entre valores medidos y estimados para las piezas maquinadas a distinto diámetro.	48
4.3. Valores RMS de a) Vibración y b) Corriente, al variar el avance.....	49
4.4. Área de desgaste de flanco en función de la corriente.	50
4.5. Área de desgaste de flanco en función de la aceleración.	51
4.6. Área de desgaste de flanco en función de la fusión de corriente y vibración.....	53

Capítulo I

1. Introducción

En la actualidad, la necesidad por automatizar los procesos de la industria es cada vez más grande. Al hablar de automatizar, se habla, no solamente de máquinas sino de procesos. Por lo que se debe hacer conciencia de aplicar nuevos métodos de producción encaminados a reducir los tiempos en los procesos y mejorar la calidad del producto maximizando, con ello, las utilidades y. Entre los procesos más importantes en el área de manufactura se encuentra el proceso de torneado, con el cual se pueden hacer un gran número de piezas de diversos materiales y formas complejas, con lo que se satisfacen necesidades específicas del mercado de consumidores.

En este tipo de proceso, se requiere tener condiciones de operación adecuadas dependiendo de la forma a maquinarse y los materiales utilizados, esto para lograr la calidad que se requiere en las piezas producidas por el proceso de torneado. Una de las condiciones de operación no deseadas es la presencia de vibraciones en el torno, estas vibraciones tienen efectos negativos en el acabado de la pieza, las dimensiones de la pieza, la máquina herramienta, la herramienta de corte y la energía consumida por la máquina herramienta, los cuales afectan de manera significativa la economía del proceso de torneado. Debido a esto, en años recientes se han llevado a cabo estudios acerca de este fenómeno y las consecuencias que trae al proceso de torneado.

Para hacer frente a esta creciente necesidad tecnológica es necesario introducir en los procesos de manufactura máquinas que sean capaces de detectar errores y poderlos comunicar a tiempo con el operario. Además de establecer una mejor comunicación hombre-máquina. Siendo estas, las máquinas de CNC (Computerized Numerical Control, Control Numérico por Computadora).

El comportamiento del desgaste de la herramienta, debido a su uso normal, bajo diferentes condiciones de corte (profundidad de corte, velocidad de avance y velocidad de

corte) es de gran importancia especialmente para máquinas-herramienta CNC ya que de dar solución al mal acabado dimensional y superficial de la pieza proceso causado por una herramienta en mal estado reducirá las malas calidades o el reproceso reduciendo los costos de producción.

El trabajo a desarrollar consiste en el monitoreo del estado de la herramienta a través de la instrumentación, sensado, análisis y procesamiento de señales de corriente y vibración presentes en el proceso de maquinado. Dichas variables deben ser analizadas con el fin de extraer información que pueda servir para generar modelos matemáticos empíricos del proceso, para posteriormente implementar un sistema de monitoreo de la herramienta.

En la presente investigación se realiza un estudio relacionado al monitoreo y análisis del desgaste de la herramienta debido a la variación de los parámetros de corte como lo son el avance y la profundidad de corte a través del análisis de señales de corriente y vibraciones producidas en el proceso de maquinado en torno de CNC mediante el uso de un sensor que fusione ambos parámetros. De esta manera en el capítulo I se hace una revisión los trabajos relacionados, además del planteamiento del objetivo general y objetivos particulares de esta investigación. El capítulo II contiene la revisión de la literatura necesaria para el desarrollo del trabajo, abordando conceptos de máquinas herramienta, herramientas de corte, desgaste de herramientas, sensores inteligentes, entre otros. En el capítulo III se muestra la metodología llevada a cabo, presentando el arreglo experimental y las condiciones en que se realizaron las pruebas. Para finalizar, en el capítulo IV se analizan los resultados obtenidos de la experimentación y el uso del sensor inteligente mediante la fusión de datos propuesta..

1.1. Antecedentes

Los procesos de manufactura han sido de gran importancia en el desarrollo económico de muchos países, y la demanda constante de mejor productividad con mayor calidad del producto al menor costo es tema de gran interés en la actualidad. Este y otros requerimientos deseables, pueden ser mejorados en las nuevas generaciones de máquinas de control numérico por computadora (CNC) (Mekid *et al.*, 2009). Específicamente en los procesos de maquinado de arranque de viruta, muchas investigaciones acerca de la optimización de condiciones de corte, detección y supresión de vibraciones, detección y

prevención de ruptura de las herramientas, así como del monitoreo del estado de desgaste de la herramienta, han sido llevados a cabo. Según Lian y Hecker (2004), existen dos métodos de medición de variables: el directo y el indirecto. Como se observa en la Tabla 1.1., se han desarrollado con algunas aproximaciones con métodos indirectos y el consecuente uso de uno o más sensores para medir fuerza, emisión acústica o vibración durante el proceso de corte. Algunos trabajos presentan modelos empíricos del comportamiento del desgaste de la herramienta, a través de simples tablas de datos, en forma gráfica, o usando técnicas de inteligencia artificial como redes neuronales, lógica difusa o algunos otros.

En cuanto a los desarrollos experimentales realizados, se encuentra el trabajo de Dimla y Lister (2000) quienes realizan el monitoreo de la condición de la herramienta de corte on-line midiendo como parámetro la fuerza y vibración, se usan como sensores un dinamómetro y un acelerómetro clasificando el desgaste, además, con redes neuronales. Por su parte, Kopac y Sali (2001) realizan el monitoreo de desgaste en torneado, utilizando un micrófono para sensar sonido y presentando gráficas para distintas condiciones de corte. Sumit y Mingyuan (2002), encuentra una relación entre el área de desgaste de flanco y las fuerzas de torneado sensando fuerza a través de un dinamómetro. Presenta modelos para relacionar los componentes de fuerza y el área de desgaste de flanco. En el mismo sentido, Abu-Zahra y Yun (2003), también monitorean el desgaste gradual en torneado, utilizando un transductor de contacto plano para medir ultrasonido, además se aplica análisis wavelet y una relación empírica a partir de redes neuronales. Dinakaran et al. (2009), realizan una investigación experimental en el desgaste de cráter para operaciones de torneado, se mide ultrasonido y se aplica un sistema neurofuzzy adaptable presentando resultados gráficos.

A su vez, Basavarajappa (2009), estudia el desgaste en compositos de grafito en torneado midiendo de forma directa dicho desgaste, concluyendo que la incorporación de grafito reduce el desgaste de la herramienta. Sayit et al. (2009), investiga el mecanismo de desgaste debido al corte interrumpido en torneado. Se mide de forma directa el desgaste y se muestra que al haber un incremento de hendiduras en la pieza, se incrementa el desgaste de la herramienta. La detección de fallas catastróficas es realizada por Satti et al. (2009) a través de la medición directa del consumo de potencia de la máquina presentando

resultados gráficos. Reñones et al. (2009) realizan un análisis experimental del consumo de la potencia eléctrica en la detección de fallas de máquinas herramienta que utilizan multi-insertos. En ese estudio se utilizan sensores de corriente de bajo costo y presenta gráficas comparativas. Dureja et al., (2003) también realizan un estudio del mecanismo de desgaste en herramientas cerámicas midiendo directamente el desgaste de abrasión a diferentes condiciones de corte. En la presente investigación presenta el desgaste cuantitativo de los insertos utilizados en el proceso de torneado mediante corriente y vibración, fusionando la corriente del servoamplificador y vibración a través de un smart sensor y modelos empíricos polinomiales del desgaste.

En cuanto al uso de sensores inteligentes, su utilización ha ido creciendo en los últimos años. Algunos ejemplos del uso de este tipo de sensores, son los trabajos de Hernández et al. (2001) donde usa un filtro de Kalman para mejorar la respuesta de varios acelerómetros empleados en automóviles bajo pruebas de desempeño. (Rangel et al., 2009) desarrollan un smart-sensor implementado en un arreglo de compuertas programables en campo (FPGA) para el monitoreo de jerk, utilizando un acelerómetro estándar como sensor primario y técnicas de sobremuestreo de la señal para disminuir el ruido de cuantización. Granados et al. (2009) realizan la medición en tiempo real de la frecuencia de línea basándose en la implementación del acondicionador de señal, conversión analógico-digital, chirp z-transform (CZT) y análisis de espectro para componer así el smart-sensor. Rivera et al. (2008) presenta la auto-calibración y respuesta óptima de un sensor inteligente con varias señales de entrada no lineales a través de redes neuronales, logrando introducir el sistema en una unidad microcontroladora (MCU) y aplicarlo al sensado de temperatura. Por su parte, Jong et al. (2009) realizan la detección de fallas en un motor de CA usando un smart-sensor, con acelerómetros, sensores de efecto Hall y flujo como sensores primarios.

1.2. Hipótesis y objetivo general

El monitoreo de variables en el proceso de torneado puede ser llevado a cabo en línea mediante el desarrollo de un sensor inteligente que incluya procesamiento, comunicación e integración de información con el uso de nuevas tecnologías. Esto permite proponer un modelo fenomenológico que relacione algunas de las variables que intervienen

en el proceso de torneado y en un paso subsecuente, predecir el desgaste o ruptura del inserto.

El objetivo general, es generar una metodología experimental y el desarrollo de un *smart-sensor* de bajo costo que permita evaluar y mejorar la estimación cuantitativa del área de desgaste de flanco de la herramienta de corte, como una función de la corriente del motor de avance y de las vibraciones en el maquinado.

1.2.1. Objetivos particulares

Como objetivos particulares, se busca:

1. Realizar la instrumentación con acelerómetros de un torno CNC.
2. Adquirir, procesar y analizar de señales de corriente y vibración.
3. Evaluar el nivel de desgaste de los insertos mediante procesamiento de imágenes.
4. Llevar a cabo la experimentación necesaria para el posterior desarrollo de un *smart-sensor* que fusione señales RMS de corriente y vibración para mejorar la detección del estado de la herramienta.
5. Obtener un modelo empírico simple del comportamiento del desgaste de la herramienta bajo condiciones de corte variables.
6. Publicar los resultados del proyecto en alguna revista científica internacional indexada.
7. Generar tesis de licenciatura en la Facultad de Ingeniería campus San Juan del Río.

1.3. Justificación

A pesar de la existencia de una gran cantidad de trabajos realizados en el monitoreo del estado de la herramienta de corte, la detección y supresión de vibraciones, detección y prevención de ruptura en los proceso de remoción de viruta, que utilizan métodos teóricos o

teórico-experimentales para el monitoreo del estado de la herramienta, es posible continuar contribuyendo en trabajos experimentales, debido a que se pueden obtener modelos empíricos a partir de datos reales. De la literatura revisada, se puede decir que aún es necesario proponer una metodología experimental que permita unir las características más deseables de los trabajos citados, tales como: medición sin sensores o el mínimo de ellos, procesamiento en línea, y en mayor medida, que esto lleve a una estimación cuantitativa del desgaste de la herramienta utilizando parámetros fácilmente accesibles en la mayoría de las máquinas herramienta.

Por otra parte el costo de los insertos y su reemplazo a llegado a ser una importante cantidad del total de los costos de producción (alrededor del 12%) según Weckenmann et al. (2003). Más aún, la nueva generación de sistemas de manufactura, tienen requerimientos dispuestos a mejora de acuerdo a Mekid et al. (2009). Estos sistemas de CNC (Control Numérico por Computadora) deben incluir algunas características tales como: integración, flujo bidireccional de datos, control del proceso, mantenimiento predictivo y optimización autónoma. Para facilitar o mejorar estas características, es necesaria la implementación de algunas características funcionales como monitoreo en línea del proceso de maquinado a través de técnicas de sensado confiables. Este problema puede ser resuelto con la utilización de un *smart-sensor* definido como aquel que reúne ciertas funcionalidades como procesamiento, comunicación e integración, de acuerdo a la clasificación dada por Rivera et al. (15) y basado en las definiciones del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), que desarrolle las características especificadas anteriormente por Mekid et al. (2009), para estimar cuantitativamente el área de desgaste en los insertos, siendo a su vez confiable y con un mínimo error en su detección. La utilización de uno o más sensores primarios, unidos al procesamiento en hardware para procesamiento, permitiría inferir los parámetros deseados con alta exactitud además de desarrollar la tarea on-line.

Es evidente la importancia de la detección de fallas y el monitoreo de desgaste, por lo que sería de gran relevancia contar con un sensor o una fusión de sensores que sea capaz de adquirir, procesar y desplegar el resultado de forma inmediata.

1.4. Planteamiento general

Básicamente, los estudios sobre desgaste de herramienta se basan en una de dos clasificaciones generales para el sensado de variables que tienen que ver en el proceso de remoción de material por arranque de viruta. Una clasificación es el sensado directo donde se utilizan sistemas de visión y procesamiento de imágenes y la clasificación de métodos indirectos donde se utilizan uno o más sensores como dinamómetros, acelerómetros, sensores de corriente de efecto Hall, de emisión acústica, entre otros, para relacionar fuerza, vibración, sonido con el desgaste (Lian y Hecker, 2004). Por otra parte, muchos de los trabajos suelen centrar su atención en un desarrollo teórico, teórico-experimental o experimental. Por lo general, un trabajo teórico utiliza modelos, simulaciones, sin experimentar o quizá en algunos casos se experimente pero de forma muy limitada. Así, un trabajo teórico-experimental partiría de un modelo matemático de cierto fenómeno y utilizaría la experimentación para validar sus teorías, mientras que un trabajo experimental se basa en resultados experimentales para la generación de modelos empíricos.

De esta manera, el presente trabajo pretende utilizar resultados experimentales para encontrar un modelo empírico del fenómeno en cuestión (Figura 1.1). Dicho modelo relacionaría el desgaste de la herramienta con las variables de corriente y vibración presentes en el proceso de maquinado en torno. Además, se utilizaría el método indirecto para poder relacionar los parámetros de corriente y vibración con el desgaste, aunado a la fusión de estos mediante el desarrollo de un sensor especializado para tal tarea.

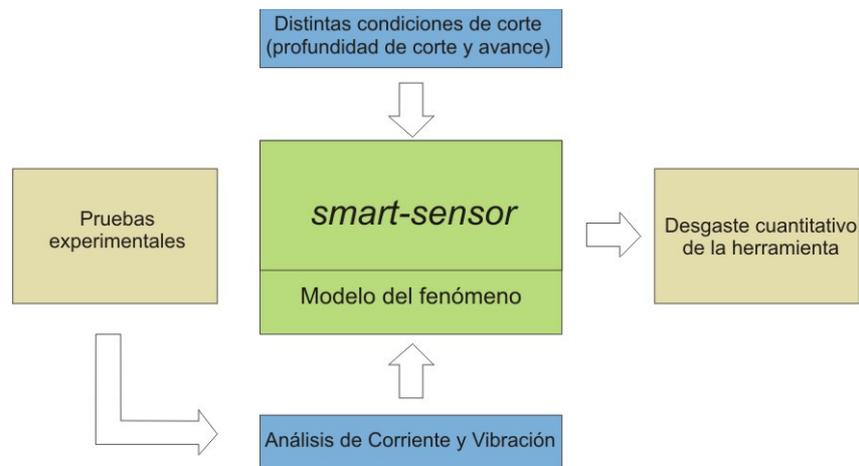


Figura 1.1. Diagrama a bloques del planteamiento general.

Capítulo II

2. Revisión de literatura

En las siguientes secciones se lleva a cabo la revisión de literatura respecto a las máquinas herramienta con Control Numérico, los principales mecanismos del proceso de corte y desgaste de las herramientas; además de la forma en que algunas investigaciones han monitoreado el estado de la herramienta, las nuevas tecnologías de procesamiento de señales, entre otros temas necesarios en el desarrollo de la investigación.

2.1. Máquinas herramienta CNC

Las metas principales de la automatización en instalaciones de manufactura son integrar diversas operaciones a manera de mejorar la productividad, incrementar la calidad y uniformidad del producto, minimizar los tiempos del ciclo y reducir los costos de la mano de obra. De esta manera, muchos procesos de manufactura han sido automatizados, entre los que se encuentran los de arranque de viruta como lo son el torneado, el fresado y el taladrado.

En general, se considera que los tornos son las máquinas herramientas más antiguas. Los tornos para metal con avance de tornillo sinfin se construyeron hasta finales de los años de 1700. El torno más común se llamó originalmente torno de motor, porque era impulsado por poleas y bandas, accionadas por motores cercanos. Hoy en día, estos tornos tienen sus motores eléctricos individuales.

A través de los años se han automatizado los tornos cada vez más. Los controles manuales de las máquinas se han sustituido con diversos mecanismos que permiten que las operaciones de corte se apeguen a un orden preestablecido. En los tornos más avanzados, el movimiento y control de la máquina y sus partes se produce mediante la inserción directa de instrucciones codificadas en forma de datos numéricos, esto es, el control numérico computarizado (CNC).

2.2. Mecánica del proceso de corte en torno



Figura 2.1. Torno CNC típico.

Un torno CNC se puede observar en la Figura 2.1. Una pieza se fija en las mordazas unidas al husillo y se utiliza una herramienta de corte sobre un portaherramientas fijo. La herramienta de corte se mueve de forma paralela al husillo y remueve material de la pieza de trabajo llamado viruta reduciendo el diámetro de esta. Un diagrama de un ciclo de cilindrado típico se puede observar en la Figura 2.2.

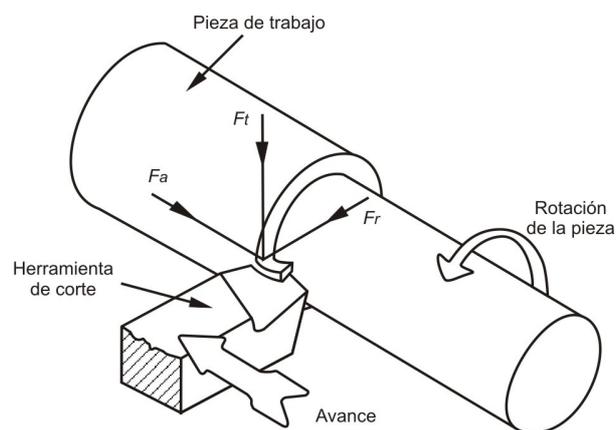


Figura 2.2. Geometría del proceso de torneado.

El material inicial en el torneado suele ser una pieza fabricada por otros procesos de manufactura como fundición, forjado extrusión o estirado. Los procesos de torneado, que se

ilustran en la Figura 2.3 son muy versátiles y pueden producir una gran variedad de formas como se describe a continuación:

- Cilindrado, para producir piezas rectas, cónicas, curvas o ranuradas (Figura 2.3a).
- Refrentado, para producir una superficie plana en el extremo de una parte (Figura 2.3b-e), en partes que se fijan a otros componentes, o ranurar caras y formar asientos para sellos de anillo en “O” (Figura 2.3f)
- Uso de herramienta formadora (Figura 2.3g) para producir diversas formas con fines funcionales o de apariencia.
- Mandrinado o perforado, para aumentar un orificio o cavidad cilíndrica, o para producir surcos internos (Figura 2.3h).
- Taladrado, para producir un orificio (Figura 2.3i).
- Tronzado, para cortar una pieza del extremo de una parte (Figura 2.3j).
- Roscado, para producir roscas externas o internas (Figura 2.3k)
- Moleteado, para producir rugosidad en contornos regulares, sobre superficies cilíndricas, como cuando se hacen perillas (Figura 2.3l).

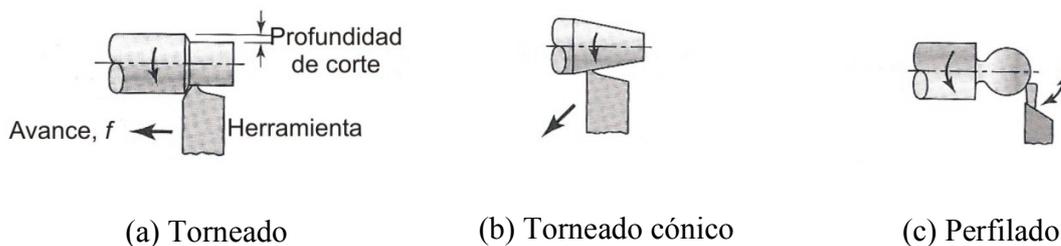


Figura 2.3. Operaciones de corte que pueden realizarse en un torno.

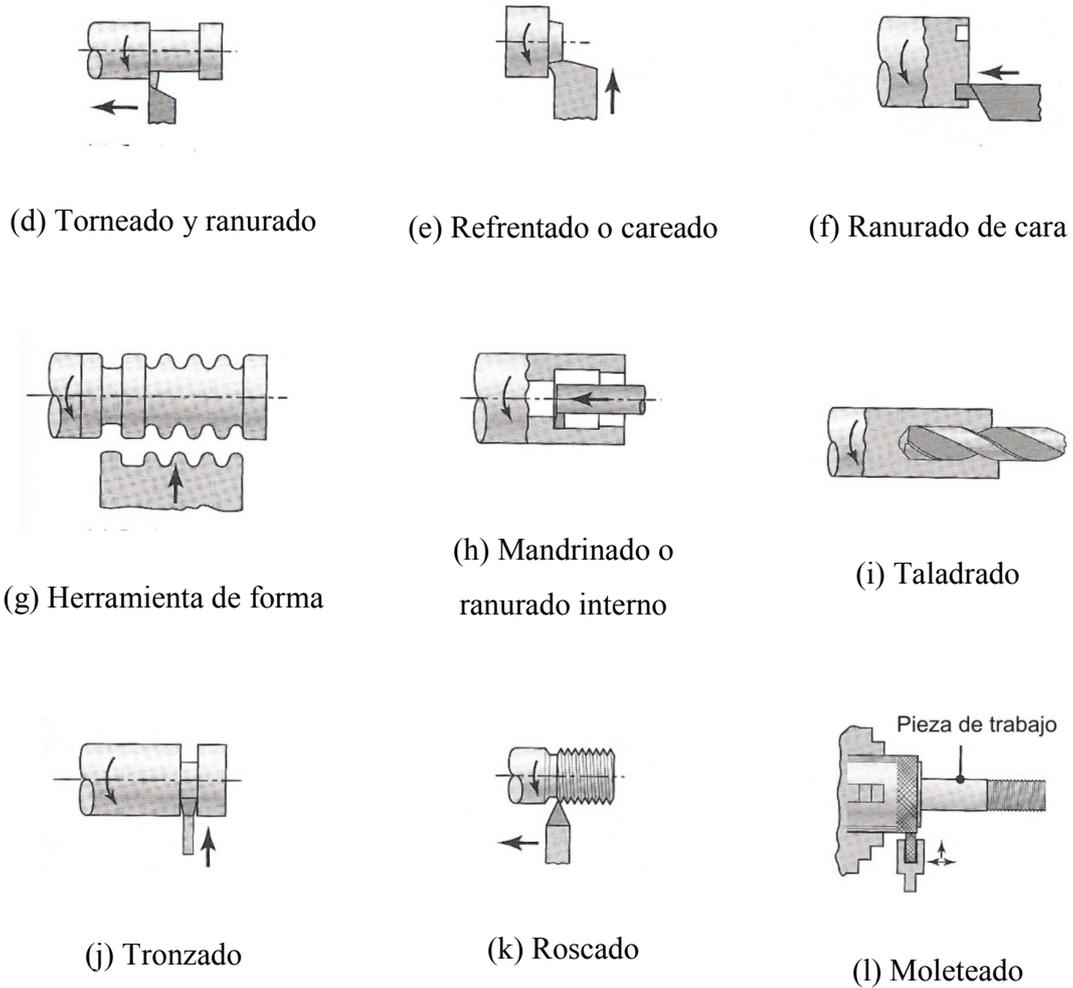


Figura 2.3 (continuación). Operaciones de corte que pueden realizarse en un torno.

2.2.1. Corte oblicuo

Todas las operaciones de corte de metal, se pueden unir al proceso que se muestra en la Figura 2.4 donde el borde cortante de la herramienta esta en contacto con la pieza de trabajo, y esta restringida al movimiento relativo de la pieza de tal manera que una capa de metal se remueve en forma de viruta. El caso particular que muestra la Figura 2.4, se define como corte oblicuo (Boothroyd y Knight, 1989).

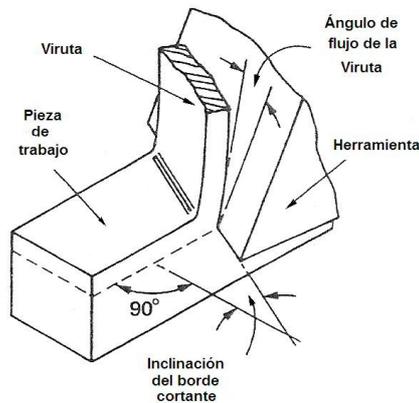


Figura 2.4. Geometría del corte oblicuo.

2.2.2. Corte ortogonal

Un caso especial del corte oblicuo, es el corte ortogonal, mismo que se muestra en la Figura 2.5, donde la arista de corte de la herramienta es colocada de forma perpendicular a la dirección del movimiento relativo entre la herramienta y la pieza de trabajo. En este caso, el corte ortogonal representa un problema bidimensional a pesar de que la mecánica del proceso es tridimensional. Esto permite, a los investigadores, limitar la mayor cantidad de variables posibles. De aquí que el arreglo de corte ortogonal es ampliamente usado en trabajos teóricos y experimentales (Boothroyd y Knight, 1989).

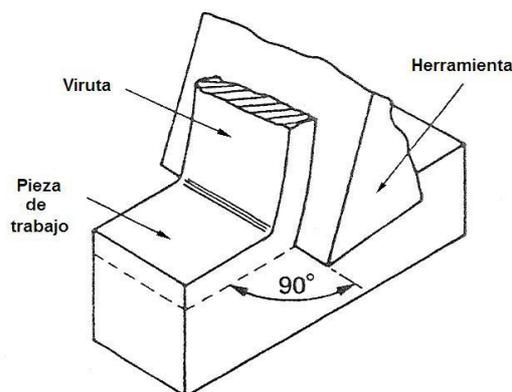


Figura 2.5. Geometría del corte ortogonal.

2.3. Cálculo de los parámetros de corte

Los procesos de corte quitan material de la superficie de una pieza y producen virutas. En la operación de cilindrado, la pieza se gira y una herramienta de corte quita una capa de material al moverse. La herramienta de corte se ajusta a determinada *profundidad de corte* a_p (mm/rev o pulg/rev). El *avance* f o *velocidad de avance* V_f es la distancia que recorre la herramienta en cada revolución de la pieza (mm/rev o pulg/rev). Como consecuencia de esta acción se produce una viruta que se mueve hacia arriba sobre la cara de la herramienta. Otro parámetro de corte muy utilizado es la *velocidad de corte* v_c (mm/min o ft/min) que es la velocidad superficial de la pieza. Esta velocidad puede ser calculada mediante la Ecuación 2.1.

$$v_c = \pi D_e N \quad (2.1)$$

donde:

D_e = Diámetro exterior de la pieza, mm o pulg.

N = Velocidad de rotación de la pieza, rpm

A su vez, la velocidad de avance V_f puede ser calculada a través de la Ecuación 2.2.

$$V_f = fN \quad (2.2)$$

En general, los parámetros de corte a_p , f y v_c para su uso en cortes de propósito general e intervalos para desbaste y acabado, son elegidas de tablas dependiendo del tipo de material a maquinarse y el tipo de inserto.

2.4. Tipos de herramienta de corte

Entre los factores más importantes de las operaciones de maquinado está la selección de materiales de herramientas de corte para determinada aplicación. Una herramienta de corte debe poseer características de dureza, tenacidad, resistencia al desgaste y estabilidad o inerte químicamente con respecto al material de la pieza. Se

dispone de varios materiales para herramientas de corte, con una amplia gama de propiedades mecánicas, físicas y químicas. Los materiales para herramientas se suelen dividir en las siguientes categorías generales:

1. Aceros al carbono y de media aleación
2. Aceros de alta velocidad
3. Aleaciones al cobalto fundidas
4. Carburos
5. Herramientas recubiertas
6. Cerámicas a base de alúmina
7. Nitruro de boro cúbico (CBN)
8. Cerámicas a base de nitruro de silicio
9. Diamante
10. Materiales reforzados con triquitas

Para su utilización en mayores velocidades para mayores producciones, se introdujeron los *carburos* (llamados también carburos *cementados* o *sinterizados*). Los dos grupos básicos de carburos que se usan en operaciones de maquinado son el *carburo de tungsteno* y el *carburo de titanio*.

El *carburo de tungsteno* (*WC*) es un material compuesto formado por partículas de carburo de tungsteno dentro de una matriz de cobalto. Con frecuencia se mezclan los carburos de tungsteno con carburos de titanio y de niobio para impartirles propiedades especiales. En general, las herramientas de carburo de tungsteno se usan para cortar aceros, fundiciones y materiales no ferrosos abrasivos, y han sustituido mucho las herramientas de acero rápido, por su mejor rendimiento.

El *carburo de titanio* (TiC) tiene mayor resistencia al desgaste que el de tungsteno, pero no es tan tenaz. Con una aleación de níquel y molibdeno como matriz, el TiC es adecuado para maquinar materiales duros, en especial aceros y fundiciones, y para cortar a mayores velocidades que las adecuadas para el carburo de tungsteno.

A partir de la década de 1960 se han estado desarrollando nuevas aleaciones y materiales para mejorar la tenacidad y la resistencia de las herramientas de corte, pero algunos tienen la desventaja de ser abrasivos y de reaccionar químicamente con los materiales de la herramienta. Esto ha llevado al desarrollo de herramientas recubiertas, las cuales pueden utilizarse a grandes velocidades de corte pudiendo durar hasta 10 veces más que las no recubiertas.

De entre los materiales que suelen usarse como recubrimiento están el nitruro de titanio (TiN), carburo de titanio (TiC), carburo-nitruro de titanio (TiCN) y óxido de aluminio (Al_2O_3). En general, estos recubrimientos tienen espesores de 2 a 15 μm (80 a 600 μpulg). En la Figura 2.6 se puede observar el recubrimiento de un inserto con varias fases sobre un sustrato de carburo de tungsteno.

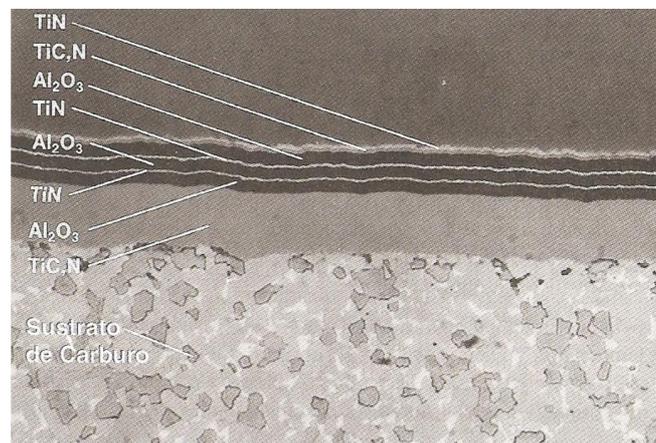


Figura 2.6. Recubrimientos de varias fases sobre un sustrato de carburo de tungsteno.

Para operaciones comunes de torneado, los insertos o “pastillas” de carburo son los más comunes en el mercado y se consiguen en gran variedad de formas, como cuadrado, triángulo, rombo y redondo. La resistencia del filo de un inserto depende de su forma.

Mientras menor sea el ángulo incluido (Figura 2.7), la resistencia del filo es menor. Para mejorar esta resistencia y evitar la ruptura, todos los filos del inserto se suelen asentar, biselar o producirles una cara negativa (Figura 2.8).

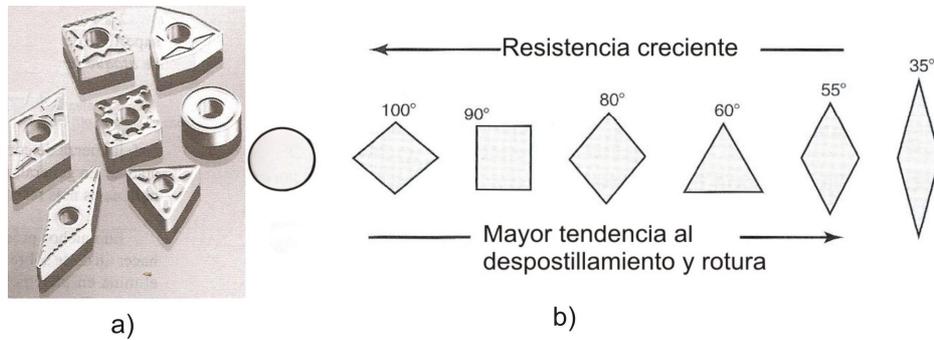


Figura 2.7. (a) Formas de insertos. (b) Resistencia relativa de arista y tendencia al despostillamiento y rotura de insertos de diversas formas.



Figura 2.8. Preparación del filo de insertos para mejorar su resistencia.

La mayor parte de los insertos de carburo que se consiguen hoy tienen una gran variedad de formas con rompevirutas. La selección de determinado tipo de rompevirutas depende del avance y de profundidad de corte en la operación, del material de la pieza, del tipo de viruta producida durante el corte, y de si se trata de una operación de desbaste o de acabado (Kalpakjian y Schmid, 2002).

2.5. Vida de las herramientas

Las herramientas de corte están sometidas a grandes esfuerzos localizados, altas temperaturas, deslizamiento de la viruta por la cara de ataque y deslizamiento de la herramienta por la superficie recién cortada. Estas condiciones inducen el desgaste de la herramienta que, a su vez, afecta en forma negativa la vida de la herramienta, la calidad de la superficie maquinada y su exactitud dimensional, y en consecuencia la economía de las operaciones de corte (Kalpakjian y Smith, 2002). Por otra parte, la vida de la herramienta esta definida como el tiempo requerido para alcanzar cierto criterio de vida. El factor más significativo que afecta la vida de la herramienta debido al uso de cierto material de la pieza de trabajo, material de la herramienta y forma de una operación de maquinado particular, es la velocidad de corte. De acuerdo a esto, en la Figura 2.9, se muestra el comportamiento de las curvas de vida de la herramienta, donde se observa la variación del desgaste de flanco respecto al tiempo de corte a diferentes velocidades de corte.

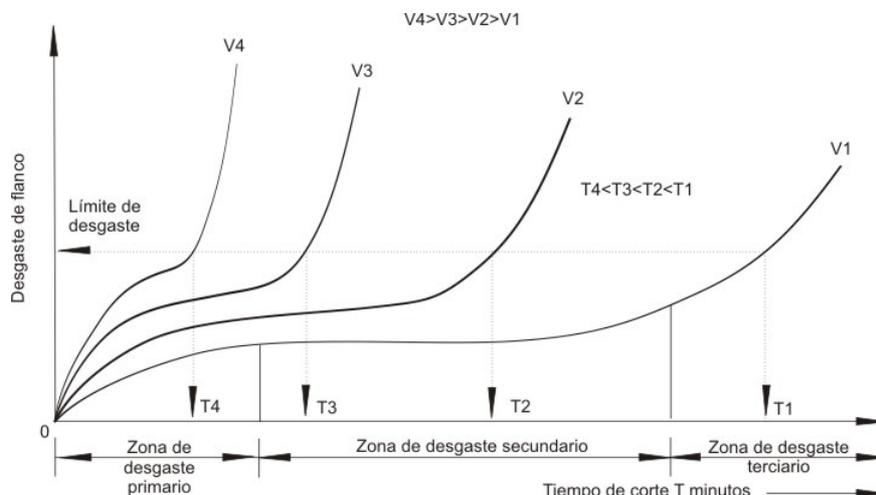
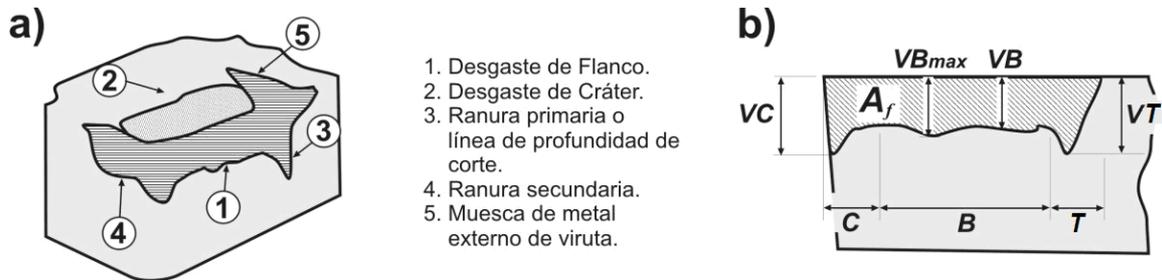


Figura 2.9. Curvas de vida de la herramienta, se muestra la variación del desgaste de flanco y el tiempo de corte a diferentes velocidades de corte (Altintas, 2000).

2.6. Desgaste de la herramienta de corte

El desgaste de la herramienta es un proceso gradual, donde la velocidad de desgaste depende del material de la herramienta, del tipo de material de la pieza de trabajo, líquido refrigerante, los parámetros de corte y otros factores. Aunque tradicionalmente, dos tipos de

desgaste han sido considerados: el desgaste de flanco y el desgaste de cráter, existen otros como por ejemplo: el desgaste de nariz, desgaste de oxidación, desgaste de muesca, entre otros, tal como se muestra en la Figura 2.10.



2.6.1. Desgaste de Flanco

El desgaste de flanco (Figura 10a) el cual afecta el área de incidencia de la herramienta, se atribuye al frotamiento excesivo con la superficie maquinada y a la alta temperatura. De acuerdo a Boothroyd y Knigh (1989), la Figura 1b presenta una vista lateral del desgaste de flanco, donde además puede observarse el desgaste de nariz (VC) en la región C , el ancho promedio de desgaste de flanco, también llamado pista de desgaste admisible (VB) en la región B , el ancho máximo de desgaste de flanco (VB_{max}) y el desgaste de muesca (VT) en la región T . La mayoría de las investigaciones se han limitado exclusivamente al estudio del desgaste de flanco en la porción central (VB). No obstante, esta región representa solo una porción del desgaste de la herramienta. Como se indicó anteriormente, en la zona también existe el desgaste de muesca y el desgaste de nariz.

A su vez, un estimador del desgaste también puede ser el área de desgaste de flanco A_f tal y como se ha mostrado en los trabajos de Scheffer et al. (2003) y Sumit y Mingyuan (2002). Esta medición contiene la ventaja de tomar en cuenta los desgastes de nariz, de muesca y de flanco como tal.

2.6.2. Desgaste de Cráter

El desgaste de cráter (Figura 10a) se presenta en la cara de ataque de la herramienta y generalmente se describe como un mecanismo de difusión causado por las altas

temperaturas entre la herramienta y la pieza de trabajo. También es causado por la afinidad química entre los materiales. Aún cuando el desgaste de cráter afecta el proceso de corte, este solo es determinante en condiciones de muy altas velocidades y su medición implica el uso de instrumentos de medición de superficies para determinar la profundidad máxima de cráter o el volumen del cráter. De esta manera, la mayoría de las aplicaciones industriales de baja velocidad utilizan el desgaste en el flanco como principal indicador del estado de la herramienta para determinar el momento de cambiarla.

2.6.3. Otros tipos de desgaste

Hay aún más mecanismos de desgaste, los cuales pueden ocurrir de forma simultánea o bien alguno de ellos puede predominar. Entre ellos se pueden señalar los siguientes:

Desgaste de adhesión. Cuando hay un movimiento relativo entre dos cuerpos, fragmentos del material más suave se adhiere o solda al más duro. Este material adherido es inestable y provoca la separación de pequeños fragmentos de la herramienta de corte. En corte de metales este efecto es conocido como *built up edge*, el cuál ocurre a bajas velocidades, pero su efecto puede disminuir con el uso de líquido refrigerante.

Desgaste de difusión. Cuando la temperatura de la herramienta y de la pieza de trabajo se incrementa considerablemente en la zona de contacto, los átomos en los dos materiales tienden a emigrar de uno a otro, es decir se difunden. Típicamente, los átomos de carbono (C) del inserto se difunden hacia el material de trabajo, por lo que la herramienta se debilita en la zona de corte, lo que puede ocasionar que se astille o se rompa.

Desgaste de oxidación. Los átomos en la herramienta de corte o pieza de trabajo forman nuevas moléculas en la zona de contacto donde se expone al aire (oxígeno). Como consecuencia, el tungsteno y el cobalto en la herramienta se oxidan lo que lleva al desgaste de muesca.

Ruptura de la herramienta. La fractura de la herramienta se define como la pérdida de una porción importante de la zona de corte, lo cual termina con toda la habilidad de corte de la herramienta (Altintas, 2000).

2.7. Monitoreo del desgaste de las herramientas

Un considerable número de investigaciones han sido realizadas en el área del monitoreo de las herramientas, debido a el hecho de que la falla de la herramienta representa el 20% de tiempo muerto y que el desgaste de la herramienta impacta negativamente en la calidad del trabajo en el contexto de dimensiones, acabado e integridad superficial.

La visión ha sido utilizada como una técnica apropiada para evaluar el desgaste de la herramienta bajo condiciones de laboratorio y se han realizado algunas aplicaciones en la industria como un método de medición directa. Sin embargo un problema particular y recurrente es usar siempre la iluminación adecuada con laser o lámparas de halógeno, lo que muchas veces no es posible. Otro problema es que el sistema debe sobrevivir prácticamente al ambiente en que se desarrolla el maquinado, la viruta y el uso de fluidos de corte atomizados (Liang y Hecker, 2004).

También se pueden utilizar otros parámetros como las fuerzas en el maquinado, las vibraciones o las emisiones acústicas. Estos parámetros se miden de forma indirecta a través de sensores primarios para sensor corriente, vibración o señales de emisión acústica.

2.7.1. Aproximaciones en el monitoreo del desgaste de la herramienta

En la tarea de monitorear el estado de la herramienta en los procesos de maquinado, se pueden realizar varias clasificaciones de acuerdo al método que se utiliza, directo o indirecto, al tipo de sensor que se utiliza o variable medida, del número de sensores primarios, etc. Debido a que se abordará el uso de una fusión de datos en un smart-sensor, se abordará una clasificación de acuerdo al número de sensores como se describe a continuación.

Algunos ejemplos de desarrollos para el monitoreo del desgaste de la herramienta con un sensor son los trabajos de Choudhury y Kishore (2000) quienes utilizan un dinamómetro para sensor las fuerzas de corte o Kopac y Sali (2001) quienes hacen uso de un micrófono como sensor. Mas aún, en otras investigaciones, más de un sensor es

utilizado tal como Dimla y Lister (2000) quienes utilizan las fuerzas de corte, medidas a través de un dinamómetro y la vibraciones obtenidas a través de un acelerómetro para reportar una clasificación cualitativa del desgaste de la herramienta con el uso de redes neuronales. En el trabajo de Cakan et al. (2008) se estudia el comportamiento del inserto debido al recubrimiento con TiN (Nitruro de Titanio) y CrN (Nitruro de Cadmio) utilizando un dinamómetro y un sensor fotoeléctrico que monitorea los cambios en el diámetro de la pieza en un proceso de torneado, al final se presenta una clasificación cualitativa del comportamiento de la señal de ambos sensores en el dominio del tiempo. Por otro lado, Salgado y Alonso (2007) emplean un sensor de efecto Hall, un dinamómetro y un micrófono para obtener corriente, fuerza y señales de emisión acústica respectivamente para predecir cuantitativamente el desgaste de flanco en torneado. Scheffer et al. (2003) utilizan múltiples sensores incluyendo uno de emisión acústica, un dinamómetro y un acelerómetro, relacionando las señales de emisión acústica y la fuerza estática para lograr la predicción cuantitativa del desgaste de flanco y su evolución respecto al tiempo, reportando un error del 5%. Deiab et al. (2009) utilizan una fusión de sensores (emisión acústica y de fuerza) para el monitoreo cuantitativo del desgaste de la herramienta mediante la utilización de clasificadores polinomiales y redes neuronales obteniendo en promedio una exactitud del 92.04%. En el trabajo de Kuljanic et al. (2009, 2008) se propone el monitoreo de vibración en una máquina fresadora utilizando acelerómetros y un dinamómetro, entonces, las señales son procesadas para extraer algunos parámetros estadísticos. Sin embargo, el procesamiento es indirecto fuera de línea en una PC. Un trabajo similar es el de Tarng y Chen (1994) donde se detecta vibración mediante un dinamómetro y redes neuronales.

2.8. Smart-sensors

En el contexto de sensores, es muy utilizado el término sensores primarios, los cuáles son los elementos transductores que se encargan de transformar una variable física a un valor comúnmente de voltaje o corriente que pueda interpretarse fácilmente. Sin embargo, se puede hallar una clasificación de acuerdo al tipo de funcionalidades que pueden presentar. Esta clasificación se da como *smart-sensor*, *intelligent sensor* y *+intelligent sensors* según la Figura 2.11.

Un *smart-sensor* puede ser definido como aquel que reúne ciertas funcionalidades como procesamiento, comunicación e integración, de acuerdo a la clasificación dada por Rivera et al. (2008) y basado en las definiciones del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE). Además, existen los sensores conocidos como *intelligent-sensors*, los cuales incluyen procesamiento, comunicación, integración y compensación, lo que los hace aún más efectivos. Por último, en la más alta categoría se encuentran los *+intelligent-sensors*. Este último tipo de sensor incluye en sus funcionalidades el procesamiento, la integración, la comunicación, la compensación y la fusión de datos.

FUNCIONALIDADES	Procesamiento	SMART SENSOR
	Comunicación	
	Integración	
	Compensación	INTELLIGENT SENSOR
	Validación	+INTELLIGENT SENSOR
Fusión de datos		

Figura 2.11. Funcionalidades de los distintos tipos de sensores.

El uso de estos tipos de sensores puede tener un gran impacto en el estudio y detección de fallas y el monitoreo del desgaste de la herramienta en procesos de corte dada su importancia, haciendo de gran relevancia contar con un sensor o una fusión de sensores que sea capaz de adquirir, procesar y mostrar los resultados en línea. A pesar de que este problema ha sido estudiado ampliamente en la literatura, no ha sido reportado aún un sensor con el procesamiento de señales embebido, que, basado en sensores primarios, determine el área de desgaste de flanco. La utilización de uno o más sensores primarios, aunado a la utilización de hardware para el procesamiento, permite inferir el parámetro deseado con alta precisión además de ser en tiempo real.

2.9. Procesamiento de señales

El procesamiento digital de señales es un área de la ciencia y la ingeniería que se ha desarrollado rápidamente en los últimos 30 años, este rápido desarrollo es resultado de

avances importantes en la tecnología digital computacional y la fabricación de circuitos digitales. La economía y rapidez de los circuitos digitales hace posible la construcción de sistemas digitales altamente sofisticados capaces de llevar a cabo complejas funciones de procesamiento digital y otras tareas, que son usualmente muy difíciles y/o muy costosas realizadas por sistemas analógicos de procesamiento digital.

Los circuitos digitales no sólo son económicos y confiables además también tienen otras ventajas. En particular, el hardware de procesamiento digital permite operaciones programables. A través del software, uno puede modificar más fácilmente las funciones del procesamiento digital a ser desempeñadas por el hardware. Por consiguiente el hardware digital asociado con el software, proporcionan un alto grado de flexibilidad en el diseño de sistemas. También es, a menudo, alcanzado un alto orden de precisión con hardware digital y software comparado con circuitos analógicos y sistemas analógicos de procesamiento de señales (Proakis y Manolakis, 1996).

2.9.1. Ventaneo en tiempo

En algunas ocasiones el procesamiento de señales requiere del uso del ventaneo en tiempo. En la práctica, si $x[j]$ es la señal a tratar y $w[j]$ la ventana, según la Ecuación 2.3, donde j es el j -ésimo dato y M el tamaño de la ventana, entonces $p[x]$ sería la señal ventaneada tal como se indica en la Ecuación 2.4.

$$w[j] = \begin{cases} 1 & -M \leq j \leq M \\ 0 & \text{cualquier otro} \end{cases} \quad (2.3)$$

$$p[j] = x[j]w[j] \quad (2.4)$$

2.9.2. Valor RMS

Un valor característico de una onda variable en el tiempo es el valor RMS. Este valor es utilizado para describir las ondas de señales eléctricas, pues se relaciona con su capacidad de suministro de energía.

Para calcular el valor RMS de una señal, se eleva al cuadrado la magnitud de la onda en cada instante. A continuación, se calcula el valor promedio (o media) de las magnitudes elevadas al cuadrado. Por último se calcula la raíz cuadrada de este valor promedio para obtener el resultado.

Matemáticamente el valor RMS de una señal discreta se escribe según se indica en la Ecuación 2.5, es decir:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^S (x_i)^2}{S}} \quad (2.5)$$

Siendo S el número de muestras de la señal discreta (Wolf y Smith, 1992).

2.9.3. Filtrado digital

En una amplia variedad de aplicaciones, resulta de interés cambiar las amplitudes relativas de las componentes de frecuencia en una señal, o quizá eliminar por completo algunas componentes de frecuencia, proceso conocido como *filtrado*. El filtrado es necesario cuando se necesita eliminar ruido o para evitar el efecto de frecuencias superiores en el proceso de muestreo (*aliasing*), etc.

El filtrado digital es esencialmente la multiplicación del espectro de la señal por la frecuencia de respuesta al impulso dominante del filtro digital.

Los sistemas lineales invariantes en el tiempo que cambian la forma del espectro se conocen como *filtros conformadores de frecuencia*. Los sistemas diseñados para dejar pasar algunas frecuencias esencialmente no distorsionadas y atenuar de manera significativa o eliminar por completo otras se conocen como *filtros selectivos de frecuencia* (Oppenheim y Willsky, 1997).

2.10. FPGA y procesamiento de señales en hardware

Los FPGA están revolucionando la forma en que se implementan infinidad de aplicaciones digitales. Estos, reducen radicalmente el costo y el tiempo de desarrollo

además de proveer una gran cantidad de dispositivos lógicos programables en un solo chip (miles de compuertas lógicas). El tamaño y la velocidad de estas tarjetas es equiparable a los circuitos integrados para aplicaciones específicas (llamados ASICs), sin embargo, los FPGA son más flexibles y el ciclo de diseño es más corto, (Richard, 1995 y Stephen 2001).

La aplicación de los FPGAs va más allá de la implementación de lógica digital y pueden ser utilizados en arquitecturas específicas. Los sistemas basados en este tipo de tarjetas proporcionan un desempeño mucho mejor que sus correspondientes en software.

La implementación en un diseño basado en FPGA hace uso de lenguajes de descripción de hardware (HDL: Hardware Description Languages). Uno de los más conocidos es el VHDL (Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language), pero no es la única opción, existen otras alternativas como el Andel-C.

El lenguaje VHDL se desarrolló para el modelado de sistemas digitales, proporcionando una sintaxis amplia y flexible que permite el modelado estructural, el flujo de datos y comportamiento de hardware. Es un lenguaje estructurado, cuyos componentes pueden ser estructuras, constantes, variables, asignaciones y funciones. Permite la integración de los sistemas digitales en un dispositivo lógico programable, desde de baja integración como una GAL (Generic Array Logic) o de mayor capacidad de integración como un FPGA o un CPLD (Complex Programmable Logic Device). Este tipo de lenguaje es además un estándar de la IEEE, lo que ha favorecido su adopción en la industria, reflejado en las constantes mejoras en las herramientas computacionales. Además, debido a su estandarización, un código VHDL puede ser portado a diferentes diseños (Richard, 1995).

Capítulo III

3. Metodología experimental

Las pruebas experimentales que se plantean para este trabajo de investigación se realizan en los laboratorios de la facultad de Ingeniería, contando con el equipo adecuado y disponibilidad de estos. Estas pruebas se llevan a cabo cuidando que las condiciones de corte se mantengan constantes, solo variando uno de los parámetros, según corresponda.

Luego se programan las trayectorias en código G para lograr la forma requerida. De esta manera, se toman en cuenta dos casos de estudio: uno que analiza el efecto del desgaste en la corriente para un ciclo de cilindrado y otro donde se analizan los efectos de variación en los parámetros de corte como la profundidad y el avance utilizando un ciclo de refrentado cónico.

3.1. Condiciones de corte

Para la determinación de las condiciones de corte en ambos casos de estudio se consideran las características del material disponible (acero AISI 1045, al mediano C) y las especificaciones dadas por el fabricante del inserto a utilizar. Así, de la Tabla 3.1, (Kalpakjian y Schmid, 2002) se obtiene el parámetro de la velocidad de corte, con lo que se puede realizar los demás cálculos de los parámetros restantes.

Tabla 3.1. Recomendaciones generales para operaciones de torneado

Material de la pieza	Herramienta de corte	Profundidad de corte a_p (mm)	Avance f (mm/rev)	Velocidad de corte v_c (m/min)
Aceros al mediano C.	Carburo recubierto con TiN	1.2 – 4	0.15-.75	45-215

Por ejemplo, tomando en cuenta el diámetro de la pieza $D = 25.4 \text{ mm}$, un avance de $f = 0.3333 \text{ mm/rev}$, velocidad de corte $v_c = 72 \text{ m/min}$ una profundidad de corte $a_p = 1.5 \text{ mm}$, entonces sustituyendo en las fórmulas 2.1 y 2.2 se obtiene una velocidad angular de 900 rpm y una velocidad de avance de 300 mm/min.

3.2. Área de desgaste de flanco y procesamiento de imágenes

En la investigación de Castejón et al., (2007) se trabaja con 1383 imágenes del área de flanco tomadas a partir de una cámara Pullnix PE2015 B/W con CCD y se utiliza un Toolbox de procesamiento de imágenes de Matlab, que permite calcular el área de desgaste de flanco. La idea general de esta metodología es utilizada en el presente trabajo, solo que desarrollando el software de procesamiento de imágenes en Visual C++.

Con el fin de medir el área de desgaste de flanco, primero se toma una micrografía del flanco de cada inserto con ayuda de un microscopio óptico NIKON EIPHOT 200 con un zoom óptico de 50X. Luego la imagen es analizada mediante procesamiento de imágenes. Para este objetivo, se desarrolló el software en Visual C++. El área se determina a partir del conteo del número de píxeles en la zona de contacto donde existe desgaste de flanco.



Figura 3.1. Equipo de microscopia.

En resumen, esta área de desgaste se calcula siguiendo los siguientes pasos:

1. *Adquisición de la imagen.* La imagen se toma con una cámara conectada al microscopio óptico y se guarda en formato BMP en escala de grises. Es importante cuidar la iluminación, ya que ésta genera cambios de contraste en la imagen, lo que puede provocar que se oculte parte del área desgastada. Esto último es más notorio en la curvatura de la nariz de la herramienta. Es conveniente mencionar que debido a las dimensiones del inserto y a la amplificación de los lentes utilizados es necesario tomar varias imágenes y después integrarlas para tener la imagen total del inserto.
2. *Obtención del contorno del área de desgaste.* El contorno del área de desgaste de flanco se traza cuidadosamente con líneas blancas continuas para cada imagen a procesar utilizando el software desarrollado. Este proceso es llevado a cabo de forma manual y puede conducir a errores en la medición por lo que debe ponerse especial cuidado en su realización. Como se mencionó en el punto anterior, la iluminación y además la buena definición de la imagen tomada, suelen ser determinantes al momento de obtener el contorno del área desgastada.



Figura 3.2. Obtención del contorno del área de desgaste.

3. *Umbralización:* Se obtiene una imagen binaria (con dominio $D_I \subset Z^2$) a través de una transformación lineal de la imagen de entrada, donde en la imagen de salida

cada píxel puede tomar solo dos valores: $\{0, 1\}$, blanco o negro, 0 ó 255. Se toma un valor de umbral T y de aquí:

$$\begin{aligned} S[x, y] &= 1, \text{ si } E[x, y] > T, \\ S[x, y] &= 0, \text{ si } E[x, y] \leq T \end{aligned} \quad (3.1)$$

Donde $E[x, y]$ especifica el píxel de entrada y $S[x, y]$ el píxel de salida con coordenadas x, y .

4. *Relleno de área*: El área definida por el contorno dibujado se rellena utilizando píxeles de color blanco (Figura 3.3), (un valor de 255), así en un paso siguiente se puede calcular el área.



Figura 3.3. Área de desgaste totalmente rellena.

5. *Filtro de área*. Este tipo de filtro permite separar los objetos con cierta área del resto de la imagen, generalmente se aplica eligiendo un valor de área la cual se desea filtrar. Si uno o más objetos de la imagen tiene un valor de área mayor o igual al especificado, solo esos objetos pasarán a la imagen de salida. Para calcular el área, se lleva a cabo un proceso de etiquetado, el cual permite contar objetos del mismo color, a su vez, esta técnica asigna distintos niveles de gris a cada componente, comenzando de izquierda a derecha y de arriba a abajo de la imagen. El concepto de vecindad es requerido en este proceso, ya que es necesario tomar en cuenta el píxel actual sino también su vecino. El tipo de rejilla permite definir la relación entre los

pixeles de la imagen. Esta rejilla descrita como G , es un subconjunto $Z^2 \times Z^2$, es decir un conjunto de parejas de pixeles. Es decir.

$$\forall p, q \in Z^2 \quad p \text{ vecino de } q \Leftrightarrow (p, q) \in G \quad (3.2)$$

El conjunto vecindad de un píxel p , en el sentido de la rejilla G , escrito como N_G , esta definido por:

$$\forall p \in Z^2, N_G(p) = \{q \in Z^2 : (p, q) \in G\} \quad (3.3)$$

En una rejilla cuadrada, un píxel $p=(x, y)$ tiene cuatro vecinos horizontales y verticales. Este conjunto vecindad es llamado 4-conexo (N_4), los 4 vecinos en diagonal al punto (x, y) , y el conjunto N_4 forman el conjunto 8-conexo, N_8 .

6. *Área total*: El último paso se lleva a cabo de forma automática a través del algoritmo de etiquetado, mismo que cuenta cada píxel en el área definida, luego esta área en pixeles se convierte a mm^2 .



Figura 3.4. Cálculo del área de desgaste de flanco mediante el software.

Debido a que la cuantificación del desgaste de la herramienta se lleva a cabo mediante la toma de micrografías y el análisis posterior de las imágenes mediante el software desarrollado en Visual C++, es necesario utilizar un factor de conversión de área

en píxeles a área en milímetros. Para validar que se trata de medición correcta, se toman diversas micrografías a una regla (Vernier), y se obtiene un promedio de la distancia que hay entre separaciones (0.025 pulg equivalentes a 0.635 mm), lo que lleva a tener que una línea recta de 216 píxeles equivalen a 0.635 mm , por lo que un cuadrado de 216×216 píxeles, equivalen a 0.4032 mm^2 . Esto es válido para el zoom utilizado, ya que si éste es distinto, el factor debe ser recalculado. Los valores de desgaste obtenidos para distintas herramientas concuerdan con rangos obtenidos por Kwon y Fischer (2003).

3.3. Caso de estudio 1: Efecto del desgaste de la herramienta en la corriente.

En este caso de estudio, se considera obtener un modelo empírico que evalúe el área de desgaste cuantitativo de desgaste de flanco como una función de la corriente del motor de avance. Para esto, se considera la siguiente metodología mostrada en la Figura 3.4: se desarrollan una serie de 10 experimentos en el torno CNC con 10 insertos diferentes, la corriente del servomotor del eje longitudinal se monitorea directamente del servoamplificador; luego se filtra analógicamente y se realiza la conversión a señal digital, a continuación se procesa con una ventana en tiempo y se calcula el valor RMS. Al final se procesan mediante una aproximación polinomial.



Figura 3.4. Diagrama a bloques de la metodología.

Los insertos utilizados en la experimentación (SNMG433MA) recubiertos con Carburo-Nitruro de Titanio (TiCN) y Oxido de Aluminio (Al_2O_3) son clasificados de acuerdo al grado de desgaste que presentan. Los insertos analizados han sufrido desgaste en condiciones normales de trabajo en una empresa metalmecánica. Se calcula el área de desgaste mediante el equipo de microscopia mostrado en la Figura 3.1 y procesamiento de

imágenes. En el experimento se utiliza un ciclo de cilindrado como el que se presenta en la Figura 3.5, mismo que consiste de cuatro pasadas. La pieza de trabajo es acero al medio carbono (AISI 1045), la velocidad de avance $V_f=100 \text{ mm/min}$, las revoluciones del husillo de $N= 600 \text{ rpm}$ y profundidad de corte $a_p=1 \text{ mm}$ por pasada.

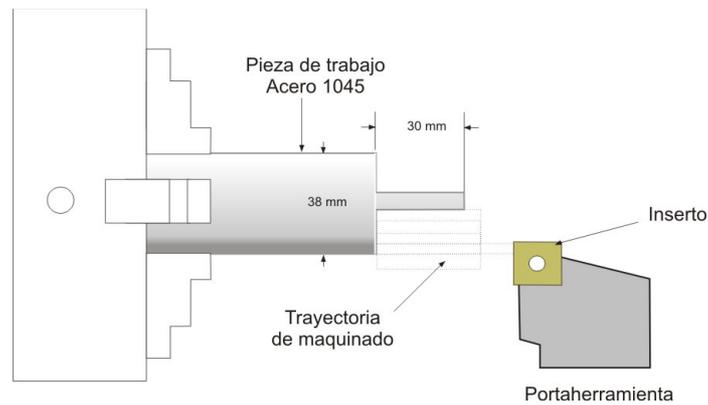


Figura 3.5. Trayectoria de maquinado para el ciclo de cilindrado.

A continuación, se numeran los pasos seguidos:

1. *Monitoreo de corriente del servoamplificador:* La señal de corriente se obtiene de forma directa del servoamplificador configurado en modo corriente, el cual provee una salida de monitoreo comúnmente presente en la mayoría de las máquinas herramienta; El servoamplificador es de la marca COPLEY 413 Series.
2. *Filtrado analógico:* La señal de corriente obtenida del servoamplificador, presenta interferencias provenientes del ruido de conmutación, la corriente de control y los efectos del tornillo de bolas. Para minimizar dichas interferencias se utiliza un filtro pasivo RC pasa bajas de primer orden y cuyos parámetros se relacionan mediante la Ecuación 3.4. La frecuencia de corte f_c se calcula con la metodología que propone Troncoso et al. (2003).

$$R = \frac{1}{2\pi f_c C} \quad (3.4)$$

3. *Adquisición de la señal de corriente (conversión A/D)*: La corriente se adquiere mediante una tarjeta OMEGA CIO-DAS08 (Figura 3.6), de 12 bits de resolución a una frecuencia de muestreo de 3.3 kSPS (kilo-Samples Per Second, kilo muestras por segundo)



Figura 3.6. Tarjeta de adquisición de datos.

4. *Ventaneo en tiempo*: Debido a los movimientos de aproximación, movimiento de corte y retorno de la herramienta, es necesario llevar a cabo un ventaneo en tiempo para tomar en cuenta solo el periodo donde se remueve el material. Esto se puede observar en la Figura 3.7, donde se ve la señal original (Figura 3.7a), la ventana (Figura 3.7b) y la señal resultante (Figura 3.7c).

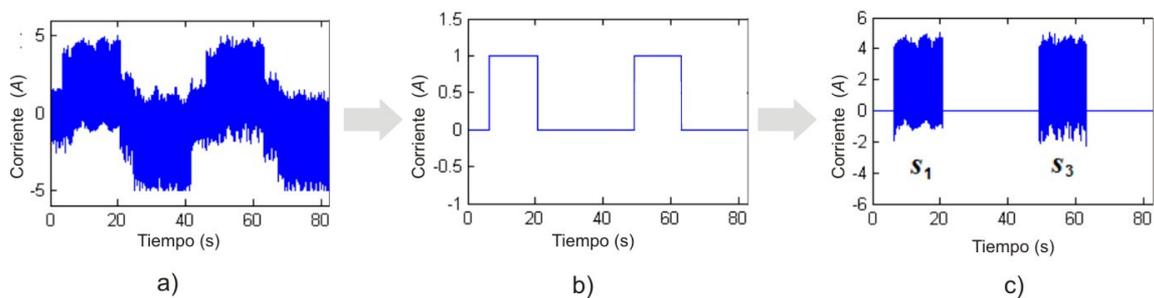


Figura 3.7. Ventaneo en tiempo de la señal de corriente a) señal original, b) ventana y c) señal ventaneada en las secciones s1 y s3.

5. *Cálculo del valor RMS*: Se calcula el valor RMS de la señal de corriente para cada una de las zonas marcadas en la Figura 3.7c. Este valor se calcula mediante la Ecuación 2.5.
6. *Aproximación de un modelo polinomial*: Se propone utilizar una aproximación polinomial utilizando como parámetro la corriente del motor de avance. Este modelo se representa en la Ecuación 3.5. Donde A_f es el área de desgaste de flanco, a_i , los coeficientes calculados mediante Matlab, n es el grado del polinomio e I_{rms} el valor RMS de la corriente.

$$A_f = \sum_{i=0}^n a_i I_{rms}^i \quad (3.5)$$

Además, por tratarse de una gran cantidad de señales a procesar, se realiza una aplicación en Matlab para auxiliarse en el proceso de análisis y obtención de los valores RMS, su comparación con los valores medidos de desgaste y el ajuste posterior mediante un modelo polinomial. Dicha aplicación se observa en la Figura 3.8. En ella se carga la imagen del inserto utilizado, la señal ventaneada, en el caso de vibración su resultante y los valores RMS obtenidos para cada una de las 3 ó 4 secciones de señal a analizar. Esto sirve para ir verificando si todo el procesamiento de la señal es correcto, principalmente el ventaneo. Toda la información se guarda en archivos de texto (*.txt).

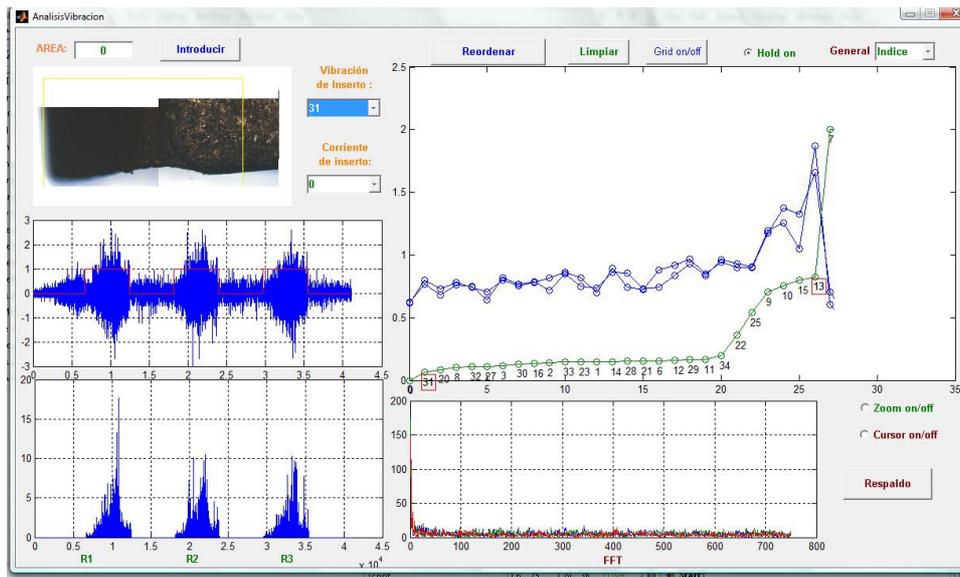


Figura 3.8. Aplicación desarrollada en Matlab para el análisis de señales.

3.4. Caso de estudio 2: Variación en las condiciones de corte.

Utilizando los resultados del primer caso de estudio, para lograr la aproximación y mejora mediante la fusión de información proveniente de sensores primarios de corriente y vibración, se propone utilizar el sistema mostrado en la Figura 3.9. También se pretende llevar a cabo una serie de experimentos en los que se varíen las condiciones de corte y así verificar su efecto. Estos parámetros de corte a variar son la profundidad de corte y el avance.

En esta misma Figura 3.9, se muestra un diagrama a bloques del *smart-sensor* propuesto para el monitoreo del desgaste de la herramienta. Las señales de vibración $A_{x,y,z}$ son obtenidas de un acelerómetro triaxial estándar y la corriente del motor de avance I se toma de forma directa del sensor de corriente del servoamplificador. El *smart-sensor* tiene dos sistemas de adquisición, DAS (Data Acquisition System): uno para la adquisición de vibración y otro para corriente. El procesamiento de la señal se lleva a cabo en una unidad HSP (Hardware Signal Processing), basado en FPGA. Además, se requiere de las señales MS (Machining Start, Comienzo de maquinado), profundidad de corte a_p y avance f como señales de entrada al sensor. Finalmente se obtiene como resultado la estimación cuantitativa del área de desgaste de flanco.

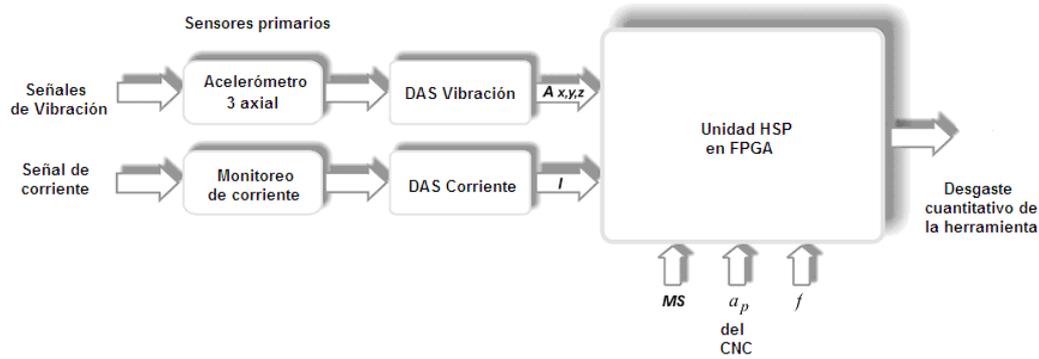


Figura 3.9. Diagrama a bloques del smart-sensor propuesto.

3.4.1. Metodología propuesta

En la Figura 3.10 se presenta el diagrama de la estructura interna de la unidad HSP para determinar el área de desgaste de flanco. La señales de vibración $A_{x,y,z}$ y la corriente del motor de avance I , son señales de entrada al sistema de adquisición correspondiente. Luego, las tres señales de vibración $A_{x,y,z}$ adquiridas con el acelerómetro triaxial, son evaluadas a través de la Ecuación 3.6, obteniendo de esta manera, la resultante A_r , la cual contiene información de los tres ejes sensados.

$$A_r = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2} \quad (3.6)$$

Después, a esta señal se le aplica un ventaneo en tiempo para tomar en cuenta solamente el tiempo cuando se realiza el proceso de corte durante el proceso de maquinado. El ventaneo inicia su procesamiento cuando la máquina CNC lo indica a través de la señal MS. Más tarde, de acuerdo a la Ecuación 3.7, se obtiene el valor RMS de la señal producida por el ventaneo en tiempo, siendo A_{ri} el dato i -ésimo y m la longitud de los datos en la ventana. Simultáneamente, la señal de corriente también se procesa con un filtro FIR pasa bajas (de orden 32 y frecuencia de corte $f_c = 120$ Hz) y su correspondiente ventaneo en tiempo. Asimismo, se obtiene el valor I_{rms} de la señal de corriente de acuerdo a la Ecuación 3.8, donde I_i representa el i -ésimo dato y m la longitud de los datos en la ventana.

$$A_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^m (A_{r_i})^2}{m}} \quad (3.7)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^m (I_i)^2}{m}} \quad (3.8)$$

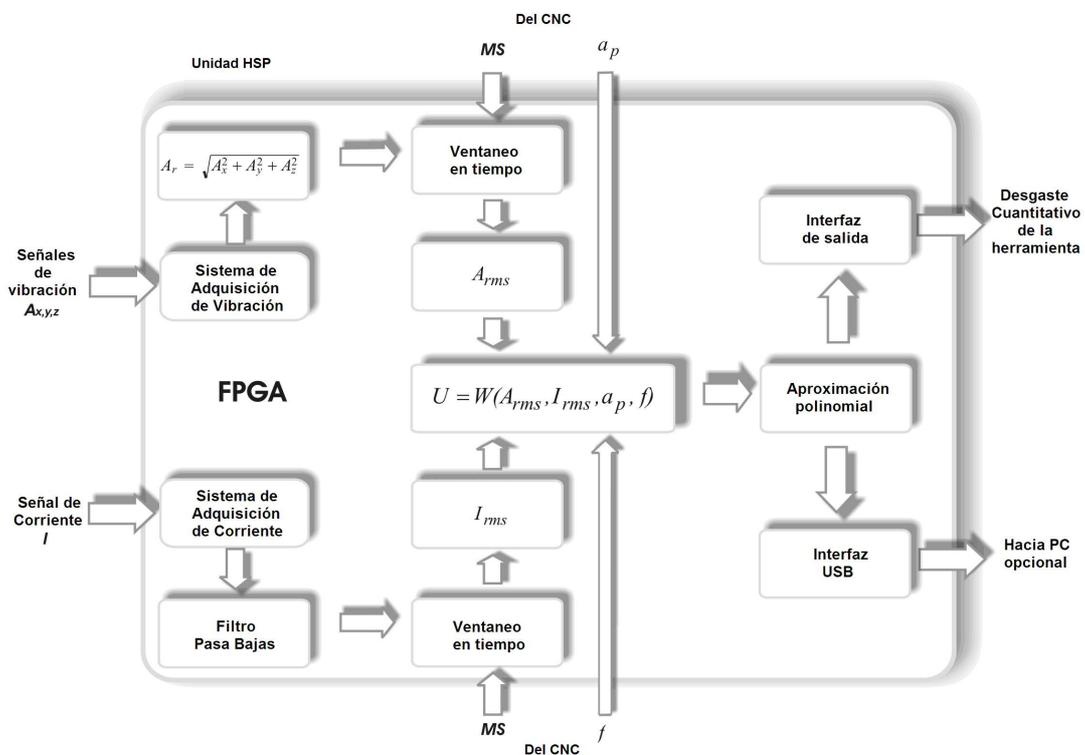


Figura 3.10. Diagrama a bloques de la unidad HSP basada en FPGA.

A partir de los resultados de las Ecuaciones 3.7 y 3.8, se propone la fusión de la información a través de una función de peso $U=W(A_{rms}, I_{rms}, a_p, f)$ (Troncoso et al, 2007) que toma en cuenta los efectos de los parámetros de maquinado: profundidad de corte a_p , y el avance f . A continuación, el área de desgaste de flanco A_f se obtiene mediante aproximación polinomial $A_f(U)$. La aproximación polinomial se muestra en la Ecuación 3.9,

donde K_C es un factor de escalamiento que depende de la profundidad de corte; n es el grado del polinomio, los coeficientes a_i y K_C son aproximados mediante Matlab y de resultados experimentales. Finalmente, el valor obtenido es enviado a un display, y de manera opcional, se envía a una computadora personal a través de una interfaz USB para su almacenamiento y análisis.

$$A_f(U) = K_C \sum_{i=0}^n a_i U^i \quad (3.9)$$

3.4.2. Procesamiento de las señales de corriente y vibración

La Figura 3.11 muestra el procesamiento de las señales de vibración y corriente, hasta la evaluación en la aproximación polinomial para obtener la estimación cuantitativa del área de desgaste de flanco A_f . Por un lado, el proceso comienza con la adquisición de vibración; entonces se calcula la vibración resultante, y después de un ventaneo en tiempo, se obtiene el valor A_{rms} . Por otro lado, la señal de corriente se adquiere y se filtra, luego se aplica un ventaneo en tiempo y se calcula el valor I_{rms} . El siguiente paso es la fusión de señales a través de la función de peso, la cual combina, aceleración, corriente y parámetros de maquinado. Finalmente, el área de desgaste de flanco se estima con la aproximación polinomial.

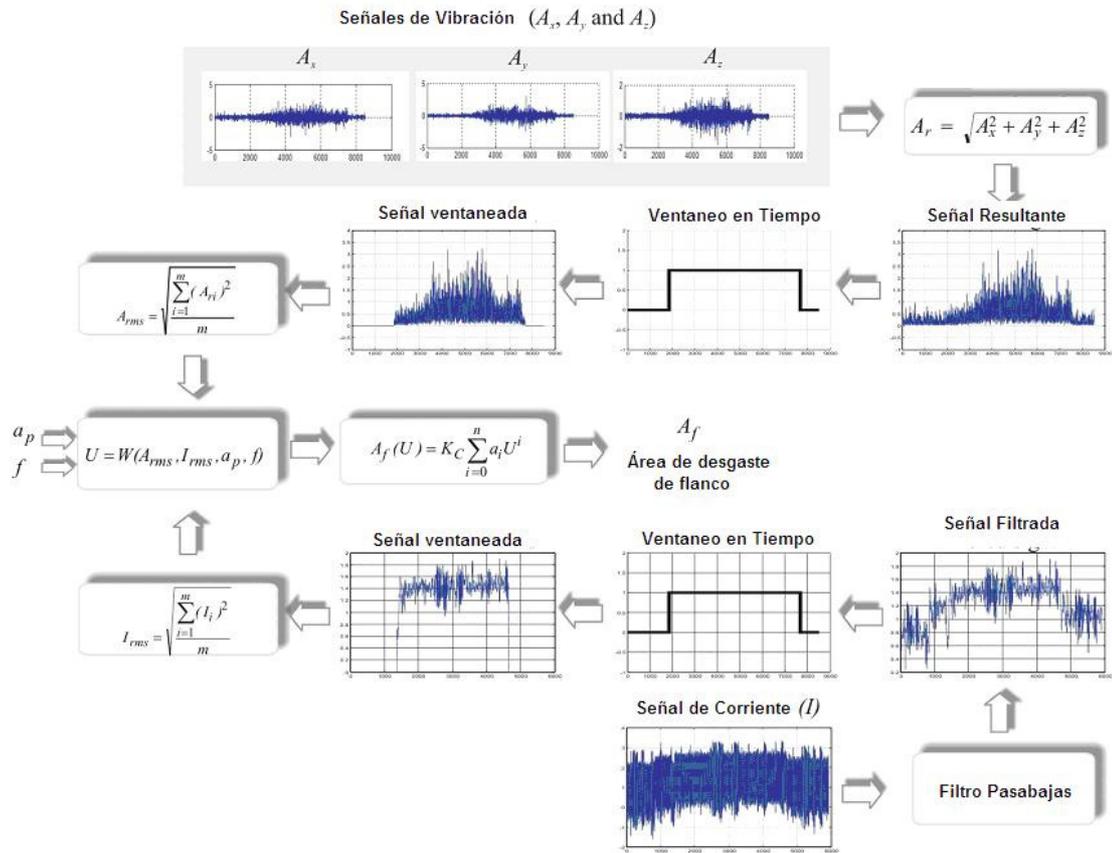


Figura 3.11. Procesamiento de señales de corriente y vibración.

3.4.3. Arreglo experimental.

Los experimentos se llevaron a cabo en un torno CNC mostrado en la Figura 3.12a. El acelerómetro encapsulado, la herramienta de corte y la pieza de trabajo se pueden observar en la Figura 3.12b donde, la tarjeta del acelerómetro incluye el acondicionador de señal y el sistema de adquisición de vibración. Además, el servoamplificador se observa en la Figura 3.12c, y la Figura 3.12d muestra la unidad de procesamiento basada en FPGA así como el sistema de adquisición de corriente utilizado en los experimentos

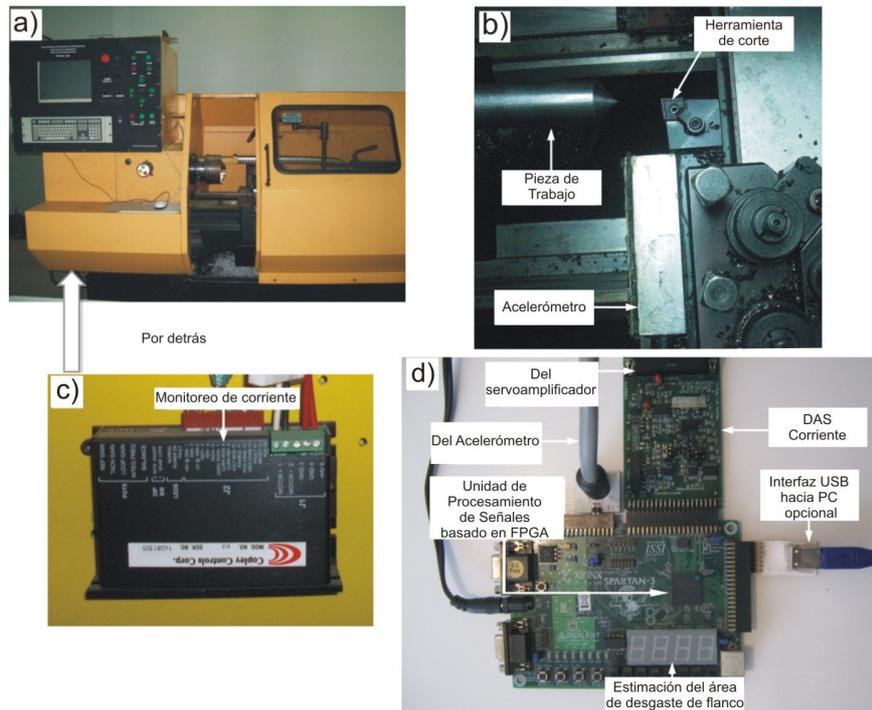


Figura 3.12. Arreglo experimental. a) Torno CNC, b).Acelerómetro y pieza de trabajo, c) Servoamplificador y d) Unidad de procesamiento de señales basado en FPGA.

Con el fin de adquirir las señales de vibración del proceso de maquinado, se utiliza un acelerómetro triaxial LIS3L02S4 de la marca STMicroelectronics con un rango de aceleración de $\pm 2g$ ($\pm 19.62 \text{ m/s}^2$), montado en el PCB junto con el acondicionador de señal, un filtro antialiasing, el sistema de adquisición de datos que consiste de 4 canales, ADC de 12-bits con una frecuencia de muestreo de $f_s = 1500 \text{ Hz}$ que provee las señales de vibración ya digitalizadas. La comunicación entre este sistema y la unidad FPGA se lleva a cabo con un transceiver MAX3243. También, el PCB del acelerómetro (Figura 3.13a) se encapsula en aluminio para lo que se diseña y se construye una caja de cierre hermético (Figura 3.13b) y así evitar posibles daños al circuito debido a la naturaleza del proceso. Todo el arreglo se ubica lo mas cercano posible a la herramienta de corte, el cable de conexión es blindado para evitar posibles ruidos de interferencia.

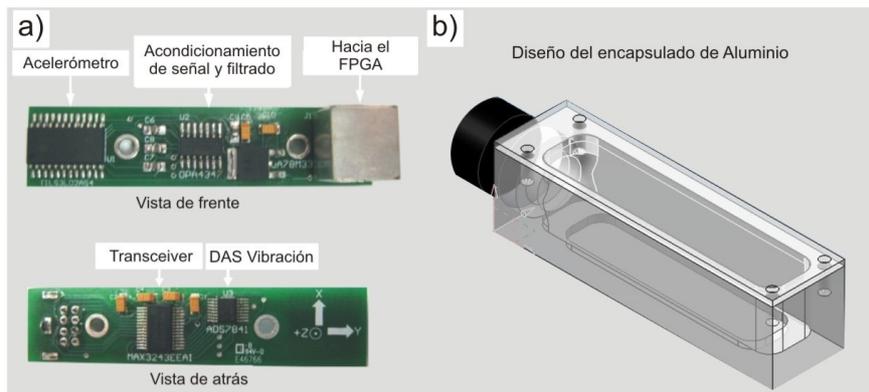


Figura 3.13. Acelerómetro a) Vista frontal y trasera del PCB y b) Diseño del encapsulado de aluminio para cierre hermético.

La señal de corriente se obtiene de un servoamplificador típico de la marca Copley Controls Group modelo 413, configurado en modo corriente. El proceso de cuantización de la señal de corriente se realiza con el sistema de adquisición mostrado en la Figura 3.12d. Dicha tarjeta contiene 2 canales de entrada analógicos de un ADC a 50 kSPS (kilo Muestras por Segundo), 2 canales de salida analógicos de un DAC a 100 kSPS y 8 entradas digitales.

Finalmente, también mostrado en la Figura 3.12d, para obtener el área de desgaste de flanco, la unidad de procesamiento de señales del *smart-sensor* se implementa en una tarjeta FPGA Xilinx Spartan -3 de 200 000-compuertas, donde el resultado de la estimación del área de desgaste de flanco se muestra en un arreglo de 4 dígitos de displays de 7 segmentos. El resultado también puede disponerse a través de una interfaz USB para su envío a una PC.

3.4.4. Parámetros de la función de peso

Para mejorar la estimación del desgaste de la herramienta, se explora una función simple a través de operaciones de suma, resta, producto y división entre los parámetros A_{rms} e I_{rms} . Se realizan 10 experimentos con 10 insertos diferentes para este propósito; los resultados se muestran en la Figura 3.14. En la Figura 3.14a y 3.14b, el comportamiento de I_{rms}/A_{rms} y A_{rms}/I_{rms} no son monotónicas, es decir no tienen un comportamiento que pueda aproximarse mediante una función sencilla, por esta razón, estas operaciones no se

consideran para tomarse como funciones de peso. Las Figuras 3.14c, 3.14d y 3.14e muestran un mejor comportamiento; de aquí que estos datos son procesados para obtener una aproximación polinomial en Matlab. Los correspondientes errores absolutos, calculados como el valor absoluto de la diferencia entre el valor medido y el valor estimado, se presentan en la Figura 3.14f. La función de peso que relaciona los parámetros A_{rms} e I_{rms} con el producto, muestran el menor error. Entonces se propone que la función de peso contenga el producto de la corriente y la vibración. Con este hecho, más adelante se deben incluir los parámetros de maquinado como el avance y la profundidad de corte.

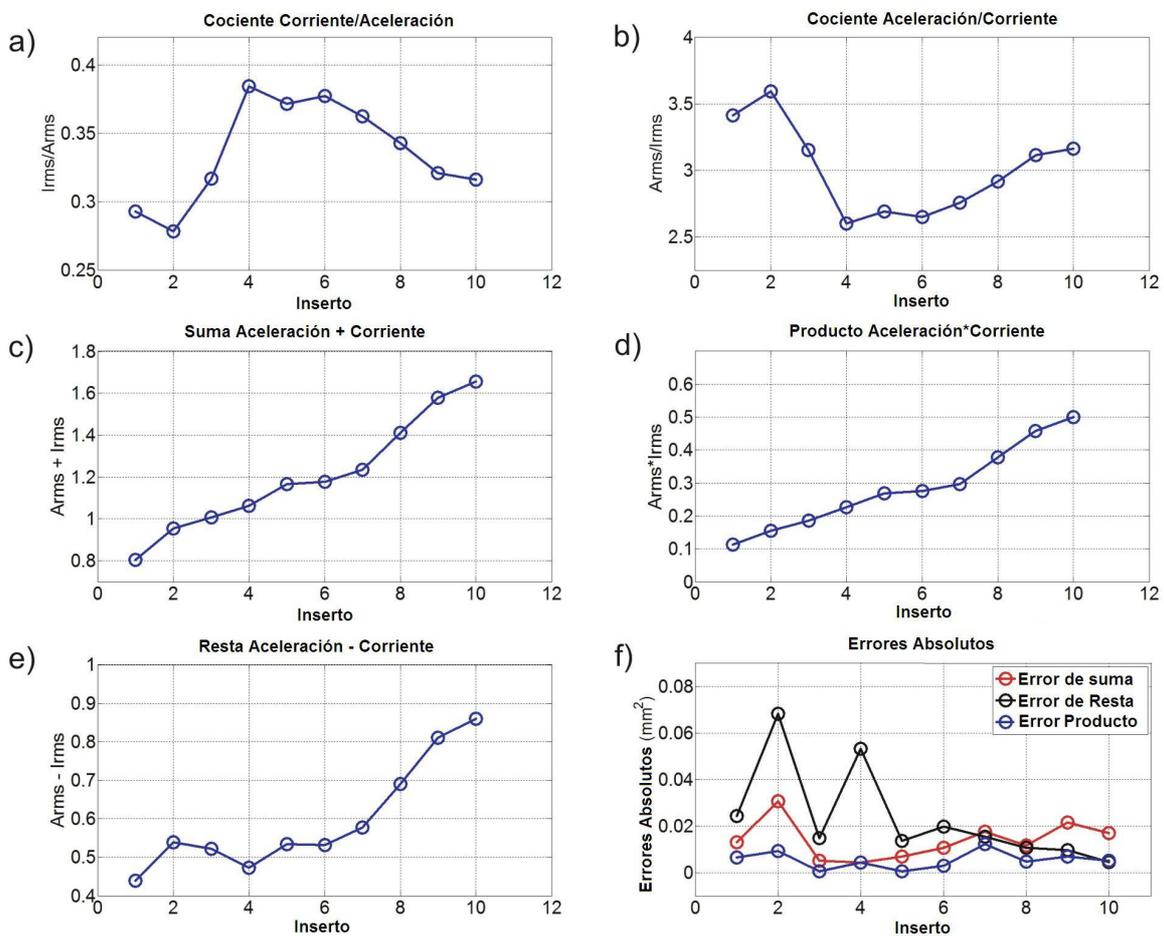


Figura 3.14. Exploración de los parámetros de la función de peso.

3.4.5. Los parámetros de maquinado y la función de peso.

La función de peso debe incluir parámetros de ajuste que consideren el efecto de las condiciones de maquinado. La Ecuación 3.10 muestra la propuesta completa como función

de peso incluyendo el producto de la corriente y la vibración. Además se agregan: un factor de escalamiento K_S y un factor de desplazamiento K_D . Incluyendo estos factores de ajuste, el *smart-sensor* es insensible a cambios en las condiciones de corte.

$$U = K_S A_{rms} I_{rms} + K_D \quad (3.10)$$

En la Figura 3.15, se muestra el efecto que se tiene sobre la función de peso (definida por $A_{rms} I_{rms}$). Al agregar los valores K_C , K_S y K_D a este modelo, la función se desplaza o se escala. El factor K_C escala la función verticalmente y es debido a la profundidad de corte (menor profundidad, menor zona de contacto entre pieza de trabajo e inserto y como consecuencia menor área de desgaste de flanco) como se muestra en la Figura 3.15a. El factor K_S también es debido a la profundidad de corte y el efecto es horizontalmente como se muestra en la Figura 3.15b. Por último, el factor K_D debido a un cambio en el avance, hace que la función se desplace a la izquierda o derecha (Figura 3.15c).

El cálculo de cada factor se basa en constantes de proporcionalidad. Por ejemplo, en la Figura 3.15a, el escalamiento que se nombrará β (medido de valores experimentales) es proporcional a un cambio en la profundidad de corte Δa_p , lo que se escribe como:

$$\beta \propto \Delta a_p \quad (3.11)$$

Por lo que introduciendo una constante de proporcionalidad k :

$$\beta = k \Delta a_p \quad (3.12)$$

De esta manera:

$$k = \frac{\beta}{\Delta a_p} \quad (3.13)$$

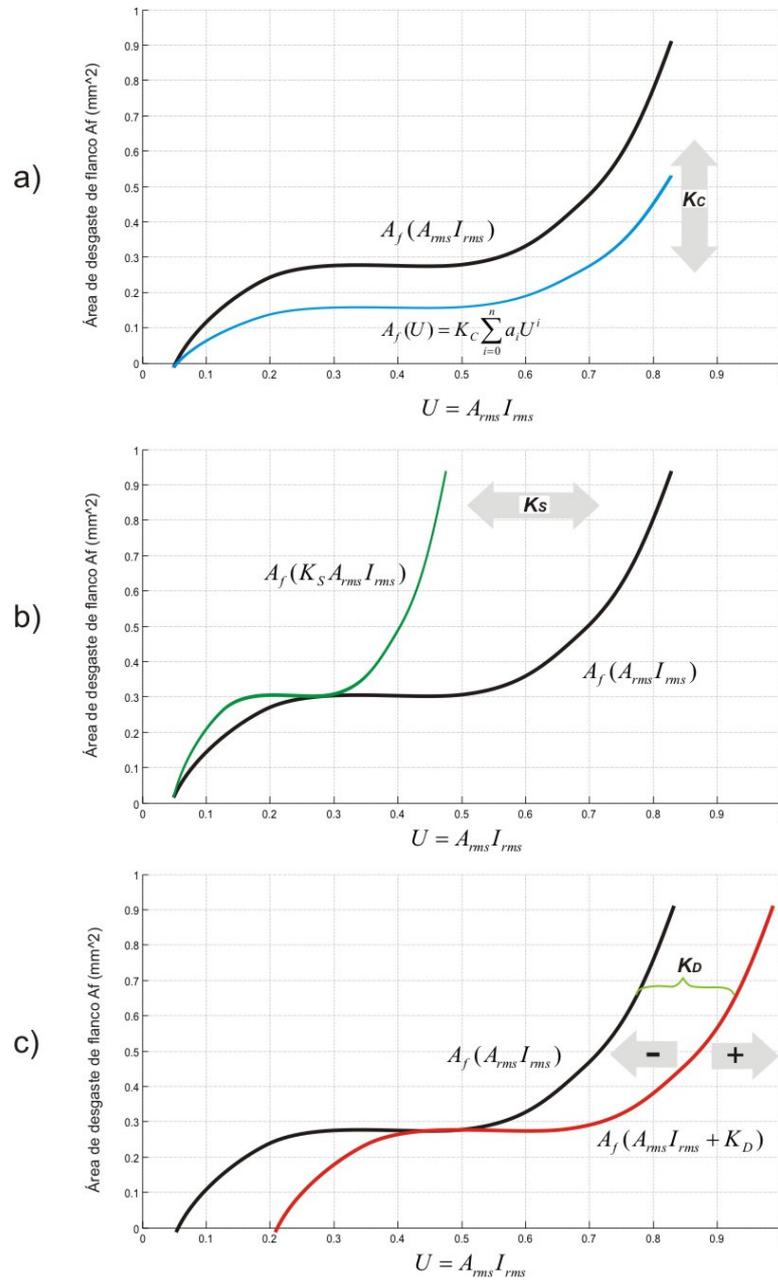


Figura 3.15. Efecto de los factores de a) escalamiento K_C debido a la profundidad de corte b) escalamiento K_S también debido a la profundidad de corte y c) de desplazamiento K_D debido al avance.

Donde β y Δa_p se pueden conocer de los datos experimentales. El valor k esta relacionado directamente con K_C o K_S , el cual considera completamente si k multiplica o divide a la función de peso (k o $1/k$), lo que provoca el escalamiento.

Siguiendo el mismo procedimiento, se puede hallar una relación similar para un cambio en el avance (Δf). Aquí, K_D se relaciona con k (sumando o restando, $\pm k$) lo que provoca el desplazamiento a izquierda o derecha del modelo de aproximación y k debido a un cambio en el avance sería:

$$k = \frac{\beta}{\Delta f} \quad (3.14)$$

Tabla 3.2. Condiciones de corte en la experimentación.

Experimento	Avance f (mm/rev)	Profundidad de corte a_p (mm)	Velocidad de corte v_c (m/min)	Inserto	Insertos diferente desgaste
1	0.3333	1.5	72	Carburo recubierto CNMG43 3MA Corte medio	10 insertos desde nuevo, desgaste medio hasta insertos rotos.
2	0.2778				
3	0.2222				
4	0.1667				
5	0.1111				
6	0.3333	2.5			
7		2.0			
8		1.5			
9		1.0			
10		0.5			

Para ajustar la función de peso con los factores de ajuste, se llevan a cabo varios experimentos. Estos experimentos consisten en 10 ciclos de torneado con 10 insertos con diferente desgaste, tomando en cuenta cinco profundidades de corte a_p y cinco avances f como se muestra en la Tabla 3.2.

Por otra parte, los insertos utilizados son de carburo de tungsteno CNMG433MA maquinando una superficie cónica (Figura 3.16), debido a que de esta manera, se pueden analizar las tres componentes de aceleración (es decir, se trata de corte oblicuo) sobre acero al medio carbono (AISI 1045) con un diámetro de material $D = 25.4 \text{ mm}$ sin refrigerante. Los insertos se clasificaron de acuerdo a su grado de desgaste que cubre el rango desde nuevo, desgaste medio hasta insertos rotos. Entonces, para propósitos de calibración, se estima el área de desgaste de flanco utilizando un microscopio NIKON EPIPHOT 200 y técnicas de procesamiento de imágenes. Los insertos fueron pertenecieron a una industria metal-mecánica local, con el propósito de tener en cuenta una muestra representativa de un proceso industrial. Las condiciones de corte se seleccionaron de acuerdo a las recomendaciones generales para procesos de torneado de aceros al medio y alto contenido de Carbono con insertos recubiertos, como se sugiere en Kalpakjian y Schmid (2006). Asimismo, se consideraron las capacidades del torno CNC.

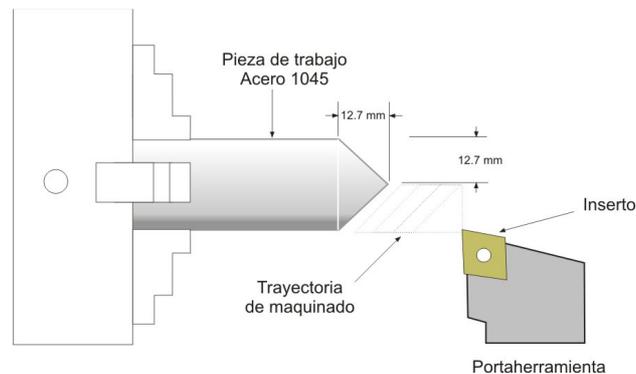


Figura 3.16. Trayectoria de maquinado del refrentado cónico.

Capítulo IV

4. Resultados y discusión

Esta sección presenta la estimación del área de desgaste de flanco utilizando tres aproximaciones: La primera metodología hace la estimación utilizando señal de corriente solamente, la segunda metodología esta basada en señales de vibración y la tercera es el método de fusión propuesto. Los resultados de estas metodologías se comparan para demostrar la mejora que produce la fusión de sensores. Las tres aproximaciones utilizan corriente y vibración que fueron adquiridas de forma simultánea para cada experimento gracias a la reconfigurabilidad del FPGA para la implementación de la unidad HSP sin llevar a cabo cambios en la configuración del hardware.

4.1. Caso de estudio 1: Efecto del desgaste y cambio en el diámetro de la pieza en la corriente

A continuación se presentan los resultados obtenidos con un ciclo de cilindrado. Tanto los datos de desgaste de las herramientas utilizadas como de los valores RMS de corriente calculados se utilizan para realizar una aproximación polinomial mediante Matlab. Esta aproximación se puede observar en la siguiente ecuación:

$$A_f(I_{rms}) = 648.4333I_{rms}^5 - 7261.202I_{rms}^4 + 32551.43I_{rms}^3 - 73019.80I_{rms}^2 + 81960.22I_{rms} - 36823.73 \quad (4.1)$$

En la Figura 4.1, se puede observar la estimación del área de desgaste de flanco para distintos diámetros de la pieza, 36, 34, 32 y 30 mm. Se puede ver que a un incremento en el desgaste de la herramienta le corresponde un incremento en el valor de corriente. Además, el comportamiento de los valores estimados es similar aún cuando se presenta un cambio en el diámetro de la pieza. Esto puede adjudicarse a un comportamiento similar de la fuerza en el sentido del avance en el corte ortogonal.

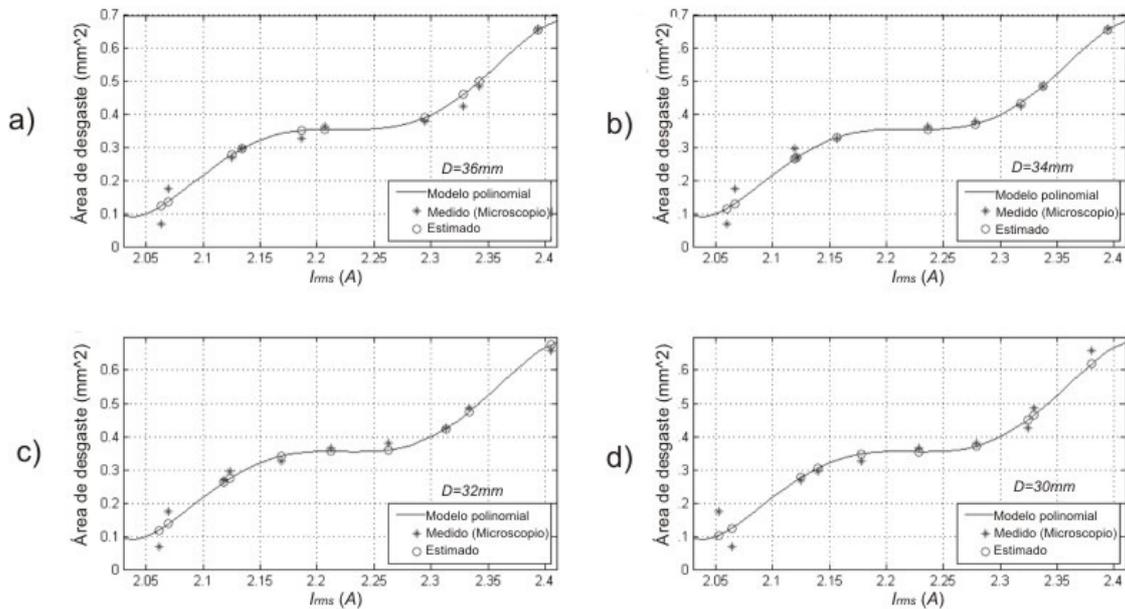


Figura 4.1. Evaluación del modelo polinomial para piezas con diámetros de a) 36mm, b) 34 mm, c) 32 mm y d) 30mm.

Los valores calculados de errores absolutos se muestran en la Figura 4.2. También se presentan algunas microfografías de los insertos utilizados. Los valores de error absoluto arrojan un promedio de 0.01 mm², una desviación estándar de 0.025 mm². El error relativo calculado para los experimentos es de alrededor del 10%, mostrando de esta forma el buen desempeño de la aproximación polinomial.

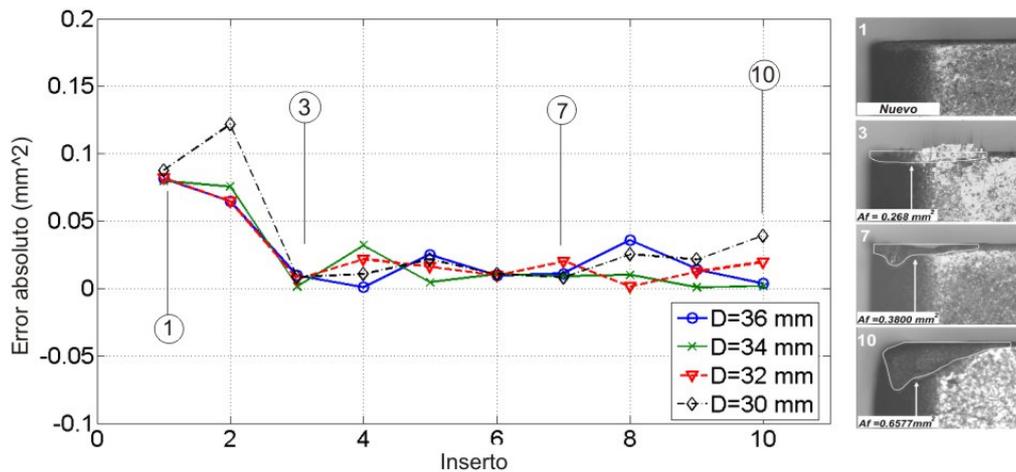


Figura 4.2. Errores absolutos entre valores medidos y estimados para las piezas maquinadas a distinto diámetro.

4.2. Caso de estudio 2: Variación en las condiciones de corte.

A continuación, en las siguientes secciones, se presentan los resultados obtenidos al variar las condiciones de corte. En las figuras 4.3 a y 4.3b se observan los resultados de vibración y corriente, respectivamente, al variar la velocidad de avance desde 100 hasta 300 mm/min para 25 insertos con distinto desgaste de la herramienta.

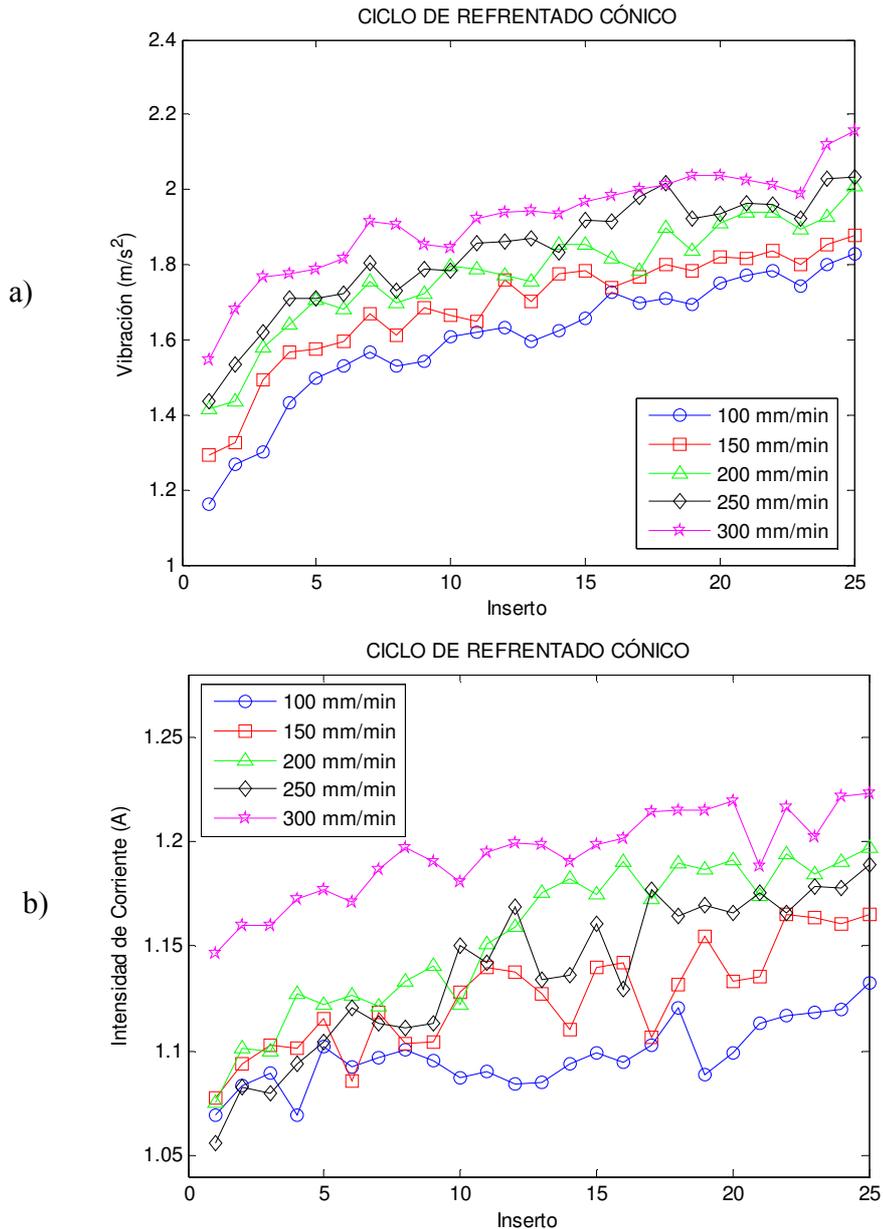


Figura 4.3. Valores RMS de a) Vibración y b) Corriente, al variar el avance.

4.2.1. Estimación del área de desgaste de flanco basada en corriente

La señal de corriente se procesa con el ajuste polinomial presentado por Scheffer et al. (2003), utilizando los parámetros de maquinado especificados en el experimento 1 de la Tabla 3.2. El área de desgaste de flanco A_f como una función de la señal de corriente I_{rms} , se estima y se compara contra el área de desgaste de flanco como se muestra en la Figura 4.4. Esta figura también muestra algunas micrografías de los insertos usados (marcados con a, b, c y d) y su valor cuantitativo de área de desgaste de flanco. Los coeficientes del polinomio de tercer grado $A_f(I_{rms})$ se ajustan mediante Matlab a partir de los resultados experimentales obteniendo la Ecuación 4.2. El error absoluto en esta aproximación reporta una media de $\mu = 0.0207 \text{ mm}^2$ y una desviación estándar de $\sigma = 0.0118 \text{ mm}^2$. El error relativo en la estimación para esta aproximación es del 12.6%.

$$A_f(I_{rms}) = 213.8785 I_{rms}^3 - 175.1362 I_{rms}^2 + 47.5507 I_{rms} - 4.1563 \quad (4.2)$$

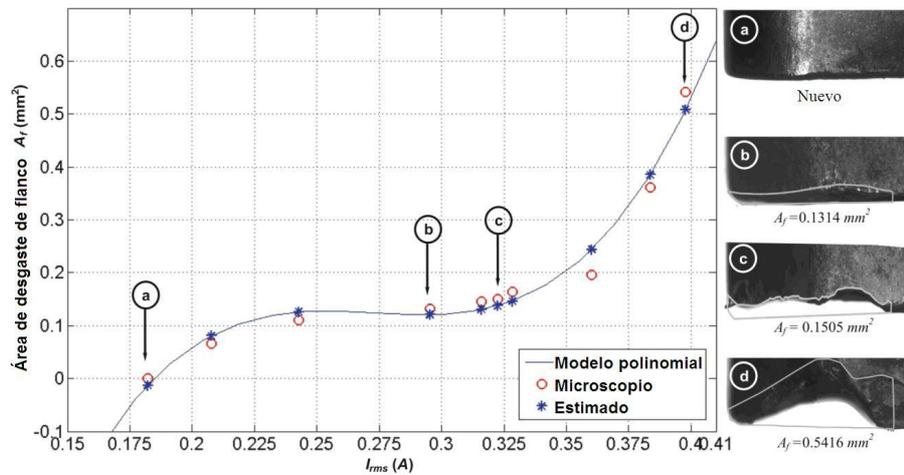


Figura 4.4. Área de desgaste de flanco en función de la corriente.

El polinomio mostrado en la Ecuación 6, es válido solo para los parámetros de maquinado especificados en el experimento 1. Si las condiciones de maquinado cambian, tales como el avance o la profundidad de corte, es necesario recalculer el polinomio de aproximación.

4.2.2. Estimación del área de desgaste de flanco basada en vibración

Este experimento utiliza el valor RMS de las señales de vibración (A_{rms}) para la estimación con la metodología de ajuste polinomial presentada por Scheffer et al. (2003), tomando en cuenta los datos parámetros de maquinado presentados en el experimento 1 de la Tabla 3.2. En la Figura 4.5, se presentan los resultados de la estimación del área de desgaste de flanco mediante esta aproximación. De la misma manera que para la señal de corriente, los valores RMS de la señal de vibración se utilizan para ajustar un polinomio de aproximación de tercer grado mediante Matlab para obtener el área de desgaste de flanco A_f como función del valor A_{rms} . Este polinomio se muestra en la Ecuación 4.3. En este caso, la media del error absoluto en la estimación es de $\mu=0.0139 \text{ mm}^2$, con una desviación estándar de $\sigma=0.0105 \text{ mm}^2$ y un error relativo del 11.99%.

De forma similar que la aproximación con corriente, si las condiciones de maquinado cambian, se debe recalcular los coeficientes de ajuste del polinomio.

$$A_f(I_{rms}) = 213.8785 I_{rms}^3 - 175.1362 I_{rms}^2 + 47.5507 I_{rms} - 4.1563 \quad (4.3)$$

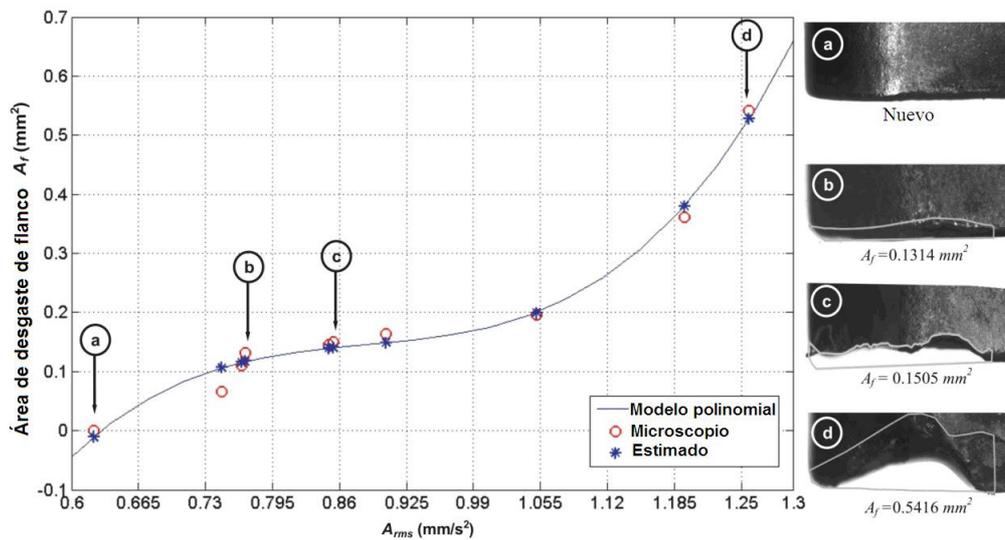


Figura 4.5. Área de desgaste de flanco en función de la aceleración.

4.2.3. Estimación del área de desgaste de flanco basada en corriente y vibración

La metodología propuesta del *smart-sensor*, consiste en la fusión de corriente, vibración y los parámetros de maquinado, tal y como se mostró en la Ecuación 3.10. La Ecuación 4.4 muestra la función de peso resultante a partir de los datos experimentales considerando todo el conjunto de condiciones de maquinado mostradas en la Tabla 3.2, donde $K_S = 1.3860$ y $K_D = 0.5836$. Una vez más, se utiliza un polinomio de tercer grado para el cálculo de los coeficientes de la Ecuación 4.5 donde ya se toma en cuenta la función de peso.

$$U = 1.3860 A_{rms} I_{rms} + 0.5836 \quad (4.4)$$

$$A_f(U) = 30.1716 U^3 - 24.8065 U^2 + 6.9746 U - 0.5220 \quad (4.5)$$

Los valores de avance y profundidad de corte tomados como base, y partiendo de ellos para el cálculo de Δf o Δa_p , son $f = 0.3333 \text{ mm/rev}$ y $a_p = 1.5 \text{ mm}$.

Al hacer la comparación de los resultados obtenidos con la metodología obtenida utilizando parámetros en forma separada se obtienen los resultados de la Tabla 4.1, el área de desgaste de flanco se estima con las mismas condiciones de corte del experimento 1 descrito en la Tabla 3.2. La Figura 4.6 muestra la estimación del área de desgaste mediante la metodología del *smart-sensor*. El error relativo para esta aproximación es del 3.7% con una media de $\mu = 0.0053 \text{ mm}^2$, y una desviación estándar de $\sigma = 0.0036 \text{ mm}^2$.

Tabla 4.1. Errores absolutos para los parámetros en forma separada y su fusión.

Error de estimación basado en corriente (mm ²)		Error de estimación basado en vibración (mm ²)		Error de estimación basado en vibración-corriente (mm ²)	
Media (μ)	Desviación estándar (σ)	Media (μ)	Desviación estándar (σ)	Media (μ)	Desviación estándar (σ)
0.0207	0.0118	0.0139	0.0105	0.0053	0.0036

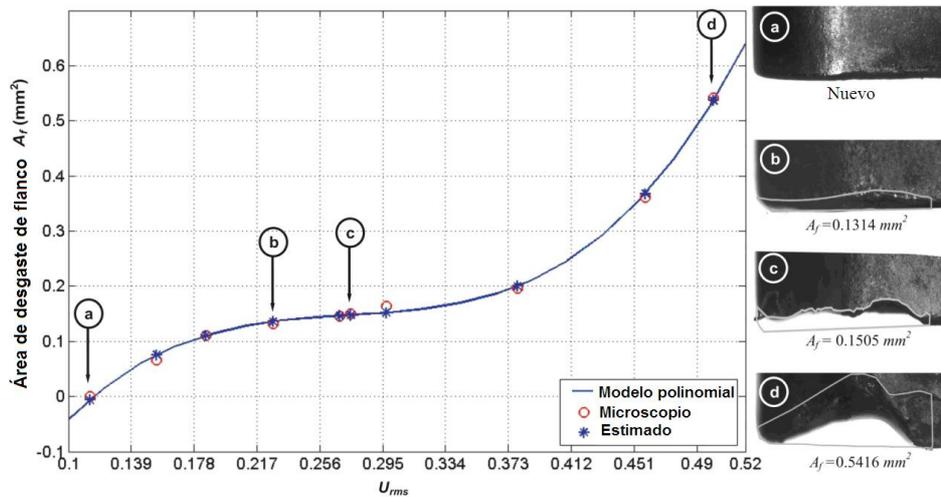


Figura 4.6. Área de desgaste de flanco en función de la fusión de corriente y vibración.

El polinomio de aproximación en la metodología propuesta del smart-sensor no requiere de recalculer los coeficientes del polinomio si se da un cambio en los parámetros de corte, lo que difiere de los polinomios de aproximación para corriente y vibración en forma separada. La Tabla 4.2 muestra los errores de estimación para todo el conjunto de condiciones de corte descritos en la Tabla 3.2.

El *smart-sensor* desarrollado con esta metodología mejora la estimación del desgaste de la herramienta, logrando menos del 4% de error relativo cuando se compara con el porcentaje obtenido con la estimación utilizando un parámetro a la vez. Esta comparación fue desarrollada considerando los mismos parámetros de maquinado para las tres aproximaciones. La estimación con un parámetro a la vez esta limitada a condiciones de corte en particular para la estimación del desgaste, mientras que al fusionar los parámetros, no se limita porque la función de peso incluye los efectos de las condiciones de maquinado.

Cuando se cambian las condiciones de maquinado en el *smart-sensor*, la función de peso ajusta la estimación del área de desgaste. Los resultados mostrados en la Tabla 3, muestran que para cinco valores diferentes de avance y cinco valores diferentes profundidades de corte, el comportamiento de la estimación tiende a ser repetible debido a

la media y desviación estándar de los errores absolutos calculados. Adicionalmente, el error relativo para el conjunto de experimentos se mantiene alrededor del 10% en promedio.

Tabla 4.2. Errores de estimación del área de desgaste de flanco por el smart-sensor para distintos experimentos de maquinado.

Experimento	Avance f (mm/rev)	Profundidad de corte a_p (mm)	Velocidad de corte v_c (m/min)	Error absoluto de la estimación basada en corriente-vibración (mm ²)	
				Media (μ)	Desviación estándar (σ)
1	0.3333	1.5	72	0.0053	0.0036
2	0.2778			0.0396	0.0533
3	0.2222			0.0599	0.0503
4	0.1667			0.0671	0.0631
5	0.1111			0.0650	0.0796
6	0.3333	2.5		0.0719	0.0504
7		2.0		0.0228	0.0255
8		1.5		0.0053	0.0036
9		1.0		0.0575	0.0663
10		0.5		0.0701	0.0902

5. Conclusiones

En esta investigación se hace un estudio del desgaste de la herramienta de corte mediante el monitoreo y análisis de señales de corriente de servomotores y vibración durante el proceso de torneado. Con este fin se desarrolla un *smart-sensor* mediante la fusión de parámetros de corriente y vibración para lograr una estimación cuantitativa del área de desgaste de flanco en insertos para procesos de maquinado, comprobando que el daño en la herramienta y los cambios en las condiciones de corte, se ven reflejados en los parámetros de corriente y vibración.

Así mismo se desarrolló un software para evaluar el nivel de desgaste de las herramientas de corte mediante el procesamiento de imágenes el cual fue validado mediante mediciones comparativas de dimensiones conocidas.

Otra importante contribución de este trabajo es el mejoramiento en la estimación del estado de desgaste de la herramienta combinando señales de corriente y vibración, fusionándolas mediante una función de peso incluyendo también los efectos de las condiciones de maquinado.

El uso de las nuevas tecnologías como lo es el procesamiento de señales en hardware mediante FPGA, permite que la implementación sea de bajo costo, siendo capaz de llevar a cabo su desempeño en línea, además de la posible aplicación en otros procesos de maquinado con máquinas herramienta de nueva generación.

Si bien, el modelo polinomial programado en el *smart-sensor* no requiere del recálculo de coeficientes, sí requiere de la introducción de los nuevos parámetros de corte a través de la interfaz USB, sin embargo sigue siendo viable.

Algo importante que hay que recalcar, es que el método propuesto es no intrusivo, es decir, no invade físicamente la herramienta como se hace en los trabajos que utilizan ultrasonido donde se modifica la estructura del portaherramienta o se debe colocar el sensor directamente en el inserto lo que limita su uso debido al posible daño del mismo.

Es importante reconocer que en la industria de manufactura actual, se cuenta con máquinas de CNC muy recientes que soportan y trabajan a altas velocidades de corte, por lo

que sería recomendable trabajar bajo esas condiciones para estar a la vanguardia en tecnología.

Con el desarrollo de la presente investigación se publica un artículo con la metodología propuesta del *smart-sensor*, con nombre: FPGA-based fused smart-sensor for tool-wear area quantitative estimation in CNC machine inserts, publicado en la revista Sensors en un número especial sobre sensores inteligentes. Dicho trabajo cuenta ya con una cita en el artículo EMMNet: Sensor Networking for Electricity Meter Monitoring en la misma revista.

También, se tiene bajo revisión el artículo: Experimental investigation on the quantitative estimation of flank-wear area in cutting Tools base don the feed-motor current, en la revista Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science.

Además, se dirigieron varias tesis individuales de licenciatura de los alumnos: José Ramón Gallardo García (titulado), Eliasib Roman Cuevas Amaro, Geovani Daniel Aguilar Villaseñor, quienes han registrado su tesis correspondiente y solo esperan trámites de titulación. Además, se continúa apoyando como asesor y co-asesor en el desarrollo de tesis de los alumnos: Moisés Caballero Guerrero y Ramiro Andalón González, todos de la licenciatura en Ingeniería Electromecánica.

También se tiene participación en el artículo publicado Improvement of the injection mold process by using vibration through a mold accessory en el Journal Materials and manufacturing processes.

Se logra la aceptación de un proyecto de investigación para la obtención de recursos con el fin de desarrollar el presente trabajo, dicho proyecto pertenece a SEP-CONACYT con número 36808, y con el cual se podrán concluir algunos trabajos de tesis de licenciatura como parte de la formación de recursos humanos.

6. Prospectivas

El estudio y desarrollos en máquinas herramienta es un área importante, sin embargo si se trabaja con máquinas de baja velocidad, la aportación puede ser limitada. En base a esto, se recomienda el uso de máquinas de nueva generación que pueden alcanzar altas y muy altas velocidades, mismas que se utilizan en la industria de manufactura.

También, se debería estudiar el uso de otro tipo de señales como sonido o fuerza que pudieran correlacionarse con el nivel de desgaste.

Incorporar la información obtenida al software CNC para que la máquina pueda modificar las condiciones de trabajo con el fin de alargar la vida de la herramienta o también emitir alarmas para el posible reemplazo de la herramienta.

Dado que la experimentación solo es válida para el torno empleado, sería interesante proponer una metodología que con un mínimo de pruebas necesarias se puedan evaluar los parámetros que definen el nivel de desgaste para otros tornos con diferentes características.

Bibliografia

Abu-Zahra, N.H. and Yu, G. (2003). Gradual wear monitoring of turning inserts using wavelet analysis of ultrasound waves. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 43, 337-343.

Basavarajappa, S. (2009). Tool wear in turning of graphitic hybrid metal matrix composites. *Mater. Manuf. Processes*, 24, 484-487.

Boothroyd, G. and Knight, W.A. *Fundamentals of Machining and Machine Tools*. (1989), 2nd Edition, Marcel Dekker Inc., USA.

Cakan, A.; Ozkaner, V.; Yildirim, M. M. (2008). Quantifying cutting and wearing behaviors of TiN- and CrNCoated AISI 1070 steel. *Sensors*, 8, 6984-6998.

Choudhury, S.K.; Kishore, K.K. (2000). Tool wear measurement in turning using force ratio. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 40, 899–909.

Deiab, I.; Assaleh, K.; Hammad, F. (2009). On modeling of tool wear using sensor fusion and polynomial classifiers. *Mech. Syst. Sig. Process*, 23, 1719–1729.

Dimla, D. E.; Lister, P.M., Sr. (2000). On-line metal cutting tool condition monitoring II: tool-state classification using multi-layer perceptron neural networks. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 40, 769-781.

Dinakaran, D., Sampathkumar S. and Sivashanmugam, N. (2009). An experimental investigation on monitoring of crater wear in turning using ultrasonic technique. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, DOI:10.1016/j.ijmachtools.2009.08.001.

Dureja, J. S., Gupta, V. K., Sharma, V. S. and Dogra, M. (2009). Wear mechanisms of coated mixed-ceramic tool during finish hard turning of hot tool die steel. *Proc. IMechE, Part C: J. Mechanical Engineering Science*, 223, DOI: 10.1243/09544062JMES1691

Evans Ken, Polywka, John, Gabrel, Stanley, (2001). Programming of computer numerically controlled machines, Volumen 1, Second Edition, Industrial Press Inc

Franco-Gasca, L.A.; Herrera-Ruiz, G.; Peniche-Vera, R.; Romero-Troncoso, R.J.; Leal-Tafolla, W. (2006). Sensorless tool failure monitoring system for drilling machines. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 46, 381-386.

Granados-Lieberman, D.; Romero-Troncoso, R.J; Cabal-Yepez, E.; Osornio-Rios, R.A.; Franco-Gasca, L.A. (2009). A real-time smart sensor for high-resolution frequency estimation in power systems. *Sensors*, 9, 7412-7429.

Hernández, W. (2001). Improving the responses of several accelerometers used in a car under performance tests by using Kalman filtering. *Sensors*, 1, 38-52.

Jong-Duk, S.; Gang, N.; Bo-Suk, Y.; Don-Ha, H.; Dong-Sik, K. (2009). Development of smart sensors system for machine fault diagnosis. *Expert Syst. Appl.* doi:10.1016/j.eswa.2009.03.069.

Jurkovic, J., Korosec, M. and Kopac, J. (2005). New approach in tool wear measuring technique using CCD vision system. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 45, 1023-1030.

Kalpakjian, S.; Schmid, S.R. (2006). *Manufacturing Engineering and Technology*, 5th ed.; Pearson Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, USA,.

Kopac J.; Sali, S. (2001). Tool wear monitoring during the turning process, *J. Mat. Proc. Tech.*, 113, 312-316.

Kuljanic, E.; Sortino, M.; Totis, G. (2008). Multisensor approaches for chatter detection in milling. *J. Sound Vib.*, 312, 672-693.

Kuljanic, E.; Totis, G.; Sortino, M. (2009). Development of an intelligent multisensor chatter detection system in milling. *Mech. Syst. Sig. Process.*, 23, 1704–1718.

Kwon, Y.; Fischer, G. W. (2003). A novel approach to quantifying tool wear and tool life measurements for optimal tool management. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 43, 359-368.

Liang, S. Y., Hecker, R. L. and Landers, R.G. (2004). Machining Process monitoring and control: The state of the art. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 126, 297-310.

Li, X. Real-time tool wear condition monitoring in turning. (2001). *Int. J. Prod. Res.*, 39, 981-992.

Li, X., Tso, S.K. Real-Time tool condition monitoring using wavelet transforms and fuzzy techniques. (2000) *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern. Part C Appl. Rev.* 30, 352-357.

Lorentzon, J. and Jarvstrat, N. (2008). Modelling tool wear in cemented-carbide machining alloy 718. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2008, 48, 1072-1080.

Mekid, S.; Pruschek, P.; Hernandez, J. (2009). Beyond intelligent manufacturing: A new generation of flexible intelligent NC machines. *Mech. Mach. Theory*, 44, 466-476.

Proakis, John G. y Malonakis Dimitris G. (1996), *Digital Signal Processing*, 3^a ed, Prentice Hall International Inc., New Jersey.

Rangel-Magdaleno, J.J.; Romero-Troncoso, R.J.; Osornio-Rios, R.A.; Cabal-Yepez, E. (2009). Novel oversampling technique for improving signal-to-quantization noise ratio on accelerometer-based smart jerk sensors in CNC applications. *Sensors*, 9, 3767-3789.

Reñones, A., de Miguel, L. J. and Peran, J.R. (2009). Experimental analysis of change detection algorithms for multitooth machine tool fault detection. *Mech. Syst. Sig. Process*, 23, 2320-2335.

Richard C. Dorf. (1995). *Sistemas inteligentes en un chip utilizando Fugas*. Editorial Santillana.

Rivera, J.; Carrillo, M.; Chacón, M.; Herrera, G.; Bojorquez, G. (2007). Self-calibration and optimal response in intelligent sensors design based on artificial neural networks. *Sensors*, 7, 1509-1529.

Rivera, J.; Herrera, G.; Chacon, M.; Acosta, P.; Carrillo, M. (2008). Improved progressive polynomial algorithm for self-adjustment and optimal response in intelligent sensors. *Sensors*, 8, 7410-7427.

Romero-Troncoso, R.J.; Herrera-Ruiz, G.; Terol-Villalobos, I.; Jauregui-Correa, J. C. (2004). FPGA based on-line tool breakage detection system for CNC milling machines. *Mechatronics*, 14, 439-454.

Salgado, D.R.; Alonso, F.J. (2006). Tool wear detection in turning operations using singular spectrum analysis. *J. Mater. Process. Technol.*, 171, 451-458.

Satti, T., Young, K. and Grover, S. (2009). Detecting catastrophic failure events in large-scale milling machines. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, doi:10.1016/j.ijmachtools.2009.07.012.

Sayit, E., Aslantas, K. and Cicek, A. (2009). Tool wear mechanism in interrupted cutting conditions. *Mater. Manuf. Processes*, 24, 476-483.

Scheffer, C.; Kratz, H.; Heyns, P.S.; Klocke, F. (2003). Development of a tool wear-monitoring system for hard turning. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 43, 973-985.

Sumit, K.S.; Mingyuan, C. (2002). Relationship between tool flank wear area and component forces in single point turning. *J. Mat. Proc. Tech.*, 128, 210-215.

Tarng, Y.S.; Chen, M.C. (1994). An intelligent sensor for detection of milling chatter. *J. Intell. Manuf.*, 5, 193-200.

Weckenmann A.; Nalbantic, K. (2003). Precision measurement of cutting tools with two matched optical 3D-sensors, *CIRP Ann. Manuf. Techn.*, 52, 443-446.

Wolf, Stanley y Smith, Richard F.M. (1992), *Guía para mediciones electrónicas y prácticas de laboratorio*, 2ª ed, Pearson Educación, México.

Apéndice A

Artículo publicado

**FPGA-based fused smart-sensor for tool-wear area quantitative
estimation in CNC machine inserts**

Sensors Journal

Apéndice B

Artículo en revisión

Experimental investigation on the quantitative estimation of flank-wear area in cutting tools base don the feed-motor current,

Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science.