



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**EVALUACIÓN DEL DESGASTE EN HERRAMIENTAS DE CORTE, MEDIANTE
SENSORES, CONTROL INTELIGENTE Y ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD**

Manuel Estuardo López Barco

Asesorado por el Ing. Miguel Ángel Chávez Molina y el
Ing. Carlos Augusto Caballeros López

Guatemala, noviembre de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL DESGASTE EN HERRAMIENTAS DE CORTE, MEDIANTE
SENSORES, CONTROL INTELIGENTE Y ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MANUEL ESTUARDO LÓPEZ BARCO

ASESORADO POR EL ING. MIGUEL ÁNGEL CHÁVEZ MOLINA Y EL
ING. CARLOS AUGUSTO CABALLEROS LÓPEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Jorge Luis Pérez Rivera
EXAMINADOR	Ing. Otto Fernando Andrino González
EXAMINADOR	Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortiz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EVALUACIÓN DEL DESGASTE EN HERRAMIENTAS DE CORTE, MEDIANTE SENSORES, CONTROL INTELIGENTE Y ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 25 de mayo de 2011.



Manuel Estuardo López Barco

Guatemala, 24 de enero de 2014

Ingeniero:
Guillermo Antonio Puente Romero
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Mecánica-Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ing. Puente Romero:

Por este medio le informo que he asesorado el trabajo de graduación titulado **“EVALUACIÓN DEL DESGASTE EN HERRAMIENTAS DE CORTE, MEDIANTE SENSORES, CONTROL INTELIGENTE y ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD”**, del estudiante Manuel Estuardo López Barco, previo a optar al título de ingeniero mecánico-electricista.

Al respecto, le puedo manifestar que luego de efectuadas las revisiones y correcciones correspondientes, encuentro satisfactorio el trabajo de graduación, tomando en consideración que el mismo cumple con los objetivos propuestos. Por todo lo anterior, lo apruebo y se lo remito para el trámite correspondiente.

El autor de este trabajo de graduación y sus asesores son responsables del contenido y las conclusiones del mismo.

Atentamente,



Ing. Miguel Ángel Chávez Molina
Colegiado No. 9426

Miguel Ángel Chávez Molina
INGENIERO MECÁNICO
Colegiado No. 9426

Guatemala, 24 de enero de 2014

Ingeniero:
Guillermo Antonio Puente Romero
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Mecánica-Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ing. Puente Romero:

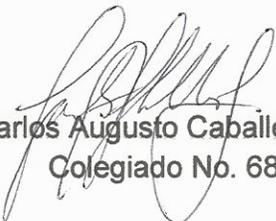
Por este medio le informo que he asesorado el trabajo de graduación titulado **“EVALUACIÓN DEL DESGASTE EN HERRAMIENTAS DE CORTE, MEDIANTE SENSORES, CONTROL INTELIGENTE y ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD”**, del estudiante Manuel Estuardo López Barco, previo a optar al título de ingeniero mecánico-electricista.

Al respecto, le puedo manifestar que luego de efectuadas las revisiones y correcciones correspondientes, encuentro satisfactorio el trabajo de graduación, tomando en consideración que el mismo cumple con los objetivos propuestos. Por todo lo anterior, lo apruebo y se lo remito para el trámite correspondiente.

El autor de este trabajo de graduación y sus asesores son responsables del contenido y las conclusiones del mismo.

Atentamente,

Carlos A. Caballeros L.
Ingeniero Electricista
Col. No. 6843


Ing. Carlos Augusto Caballeros López
Colegiado No. 6843



FACULTAD DE INGENIERIA

Ref. EIME 26. 2014
Guatemala, 20 de FEBRERO 2014.

Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado: EVALUACIÓN DEL DESGASTE EN HERRAMIENTAS DE CORTE, MEDIANTE SENSORES, CONTROL INTELIGENTE Y ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD, del estudiante Manuel Estuardo López Barco, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Francisco Javier González López
Coordinador Area Potencia



STO



FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 26. 2014.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; **MANUEL ESTUARDO LÓPEZ BARCO** titulado: **EVALUACIÓN DEL DESGASTE EN HERRAMIENTAS DE CORTE, MEDIANTE SENSORES, CONTROL INTELIGENTE Y ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD,** procede a la autorización del mismo.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Guillermo Antonio Puente Romero'.

Ing. Guillermo Antonio Puente Romero



GUATEMALA, 10 DE JUNIO 2,014.



DTG. 635.2014

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN DEL DESGASTE EN HERRAMIENTAS DE CORTE, MEDIANTE SENSORES, CONTROL INTELIGENTE Y ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD**, presentado por el estudiante universitario **Manuel Estuardo López Barco**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
Decano en Funciones



Guatemala, 12 de noviembre de 2012.

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Sin Él, nada es posible.
Mis padres	Manuel de Jesús López Hernández e Irma Barco Florián de López, por su apoyo incondicional.
Mi abuela	Juana Florián Guevara (q.e.p.d.) por ser como una segunda madre.
Mis hermanos	Verónica y Pablo López Barco. Por ser parte de mi vida.
Mis sobrinas	María Jimena y Leslie Alejandra Campo López, por dar esa pizca de alegría y esperanza en mi vida.
Mis tíos y primos	Por su cariño y estima hacia mi persona.
Mis amigos y novia	Por estar siempre conmigo en las buenas y las malas.

AGRADECIMIENTOS A:

La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por brindarme la oportunidad de acceder a la educación superior.
Facultad de Ingeniería	Por la rigurosa formación académica que brinda al estudiante.
Escuelas de Mecánica Eléctrica y Mecánica	Por la invaluable formación profesional que me brindaron ambas.
Cervecería Centroamericana, S. A.	Por permitirme iniciar mi desempeño profesional en sus instalaciones.
Miguel Ángel Chávez Molina	Por compartir sus criterios profesionales sin ningún tipo de egoísmo.
Carlos Augusto Caballeros López	Por brindarme su apoyo a través de su amistad, sus conocimientos y experiencia profesional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
GLOSARIO	XVII
RESUMEN.....	XXV
OBJETIVOS.....	XXVII
INTRODUCCIÓN.....	XXIX
1. CONCEPTOS SOBRE DESGASTE, HERRAMIENTAS DE CORTE Y MÁQUINAS-HERRAMIENTAS	1
1.1. Definición de fricción	1
1.1.1. Fricción estática.....	1
1.1.2. Fricción cinética.....	2
1.2. Definición y tipos de herramientas de corte.....	2
1.2.1. Buriles.....	7
1.2.2. Fresas.....	8
1.2.3. Brocas	11
1.3. Desgaste en herramientas de corte.....	12
1.4. Vida útil de la herramienta de corte	15
1.5. Recubrimientos PVD en herramientas de corte.....	19
1.6. Funcionamiento de las máquinas-herramientas.....	21
1.6.1. Torno	23
1.6.1.1. Velocidad de corte en el torneado	25
1.6.2. Taladro	26

1.6.2.1.	Velocidad de corte, movimiento de avance y refrigeración en el taladrado	28
1.6.3.	Cepillo	28
1.6.3.1.	Velocidad de corte en el cepillado	30
1.6.4.	Fresadora	30
1.6.4.1.	Velocidad de corte en el fresado	34
1.7.	Situación en Guatemala	34
2.	AUTOMATIZACIÓN EN PROCESOS DE MECANIZADO	39
2.1.	Control numérico computarizado (CNC)	40
2.1.1.	Arquitectura general de un control numérico	43
2.2.	Torno CNC	44
2.2.1.	Partes de un torno CNC	45
2.3.	Servomotores y servomecanismos en tornos CNC	45
2.3.1.	Definición de servomotor	45
2.3.2.	Definición de servomecanismo	47
3.	MONITOREO DEL DESGASTE DE UNA HERRAMIENTA DE CORTE CON SENSORES DE PROXIMIDAD	49
3.1.	Sensores y transductores	50
3.1.1.	Características de los transductores	53
3.2.	Métodos de detección del desgaste en herramientas de corte	55
3.2.1.	Criterio de duración de las herramientas de corte	55
3.2.2.	Monitoreo de la corriente del motor eléctrico	57
3.2.3.	Monitoreo de la emisión acústica del proceso de corte	57
3.2.4.	Monitoreo de la fuerza de corte	59

3.3.	Monitoreo con sensor de proximidad de fibra óptica (SPFO) ..	60
3.3.1.	Descripción del SPFO	60
3.3.2.	Arreglo experimental para el monitoreo	63
3.3.3.	Gráficas de resultados	64
3.4.	Situación en Guatemala	66
4.	EVALUACIÓN DEL DESGASTE EN HERRAMIENTAS DE CORTE EN PROCESOS DE TORNEADO, MEDIANTE MONITOREO INTELIGENTE	69
4.1.	Definición de control inteligente	69
4.1.1.	Inteligencia artificial	70
4.1.2.	Lógica difusa y funciones de pertenencia	71
4.1.3.	Técnicas de monitoreo basado en modelos	73
4.2.	Monitoreo del desgaste en herramientas de corte en procesos de mecanizado	74
4.3.	Plataforma experimental para el monitoreo del torneado	77
4.4.	Monitoreo inteligente en el proceso de torneado	86
4.4.1.	Monitoreo con ANFIS	87
5.	MONITOREO DEL FRESADO DE MOLDES EN TIEMPO REAL MEDIANTE REDES DE SEÑALES INTERNAS	103
5.1.	Redes neuronales	105
5.1.1.	Redes neuronales en el monitoreo del desgaste de herramientas de corte	107
5.2.	Plataforma experimental	109
5.3.	Sensibilidad de las señales internas del CNC	113
5.3.1.	Comparación entre la señal de la corriente en el cabezal y las señales externas de la fresadora CNC	113

5.3.2.	Sensibilidad de las señales internas del proceso de fresado de moldes con respecto a los parámetros de corte	115
5.4.	Señales internas en el monitoreo de la herramienta de corte o fresa	117
5.5.	Selección automática de descriptores.....	119
6.	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE CONFIABILIDAD PARA HERRAMIENTAS DE CORTE APLICADO AL PROCESO DE TALADRADO	125
6.1.	Análisis de confiabilidad	126
6.1.1.	Análisis de confiabilidad por modos y efectos de falla.....	127
6.1.2.	FMEA aplicado al proceso de taladrado.....	128
6.2.	Análisis experimental de desgaste para herramientas de corte aplicado al proceso de taladrado.....	130
6.2.1.	Diagrama Causa-Efecto para el proceso de taladrado	130
6.3.	Desgastes de flanco y de cráter en las brocas.....	131
6.4.	Arreglo experimental	134
6.5.	Función de densidad de probabilidad del ensayo	137
6.6.	Situación en Guatemala	142
7.	EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LAS HERRAMIENTAS DE CORTE EN EL PROCESO DE CILINDRADO, EMPLEANDO NÚMEROS ADIMENSIONALES.....	145
7.1.	Análisis dimensional.....	146
7.2.	Análisis dimensional aplicado al mecanizado de metales	147
7.3.	Arreglo experimental	148

7.3.1.	Metodología del experimento.....	151
7.4.	Análisis de resultados.....	151
7.5.	Situación en Guatemala	159
8.	ANÁLISIS ECONÓMICO DEL MONITOREO DEL DESGASTE DE HERRAMIENTAS DE CORTE EN PROCESOS DE MECANIZADO DE METALES.....	161
8.1.	Piezas que se fabrican en un taller de metal-mecánica	162
8.2.	Información, datos y costo de las herramientas de corte.....	165
8.2.1.	Criterio para la elección de herramientas de corte en el torneado.....	165
8.2.2.	Criterio para la elección de herramientas de corte en el fresado	166
8.2.3.	Criterio para la elección de herramientas de corte en el taladrado	167
8.2.4.	Estimación de la vida útil y horas de uso de las herramientas de corte.....	168
8.2.5.	Costo en el mercado de las herramientas de corte.....	169
8.3.	Inversión para realizar el monitoreo del desgaste en herramientas de corte.....	169
8.3.1.	Inversión inicial del monitoreo con sensor de proximidad de fibra óptica (SPFO).....	170
8.3.2.	Inversión inicial del monitoreo inteligente del proceso de torneado.....	171
8.3.3.	Inversión inicial del monitoreo del fresado de moldes en tiempo real	173
8.4.	Análisis económico de los métodos de monitoreo de desgaste en herramientas de corte	176

8.4.1.	Definición de Valor Presente Neto (VPN).....	176
8.4.2.	Definición de Tasa Interna de Rendimiento (TIR) .	177
8.4.3.	Consideraciones para el cálculo de la TIR en el monitoreo del desgaste en herramientas de corte	177
8.4.4.	Cálculo de la TIR para el monitoreo con SPFO.....	178
8.4.5.	Cálculo de la TIR para el monitoreo inteligente del proceso de torneado.....	183
8.4.6.	Cálculo de la TIR para el monitoreo del fresado de moldes en tiempo real	187
8.5.	Resumen comparativo de los métodos de monitoreo de desgaste en herramientas de corte	191
CONCLUSIONES.....		193
RECOMENDACIONES		195
BIBLIOGRAFÍA.....		197

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Ángulos en una herramienta de corte: $90^\circ = \alpha + \beta + \theta$	4
2.	Planos y movimiento del buril en el corte	5
3.	Gráfica dureza vs temperatura para materiales empleados en herramientas de corte	6
4.	Distintos tipos de buriles empleados en tornos	7
5.	Fresa de módulo de perfil constante	9
6.	Fresas cilíndricas	9
7.	Fresa circular o de disco	10
8.	Fresa de plato	11
9.	Brocas helicoidales	11
10.	Desgaste de flanco (a) y de cráter (b) en la herramienta de corte	16
11.	Ancho del desgaste de flanco en función del tiempo de corte a distintas velocidades	17
12.	Gráfica vida de la herramienta de corte vs la velocidad de corte en escala logarítmica	18
13.	Torno de puntas moderno	24
14.	Taladro de columna.....	26
15.	Cepillo de codo	29
16.	Fresadora universal.....	31
17.	Fresadora universal moderna	32
18.	Mecanismo divisor universal	33
19.	Serie de instrucciones de un programa de maquinado	42
20.	Torno CNC	44

21.	Servomotor	46
22.	Sensores de proximidad inductivos	52
23.	Sensores de proximidad capacitivos.....	52
24.	Sensor de proximidad óptico	53
25.	Diagrama de bloques de un transductor de proximidad. Tx es transmisión y Rx recepción.....	54
26.	Herramienta de corte ya desgastada	56
27.	Componentes de fuerza en la herramienta de corte en el torneado	59
28.	Sensor fotónico.....	61
29.	Curva de respuesta que relaciona el voltaje de salida y la separación a la superficie objetivo	62
30.	Arreglo experimental para el monitoreo	63
31.	SPFO y fresa circular.....	64
32.	Voltaje de salida del SPFO vs el tiempo	65
33.	Gráfica polar del desgaste	66
34.	Función de pertenencia de forma gaussiana	72
35.	Imágenes de procesos de torneado.....	76
36.	Plataforma experimental para el monitoreo del proceso de torneado...	78
37.	Acelerómetro piezoeléctrico de cuarzo	79
38.	Analizador de vibraciones PCE-VT204 y accesorios para la adaptación del sensor (acelerómetro).....	80
39.	Diagrama del circuito eléctrico del filtro pasa-bajo.....	82
40.	Datos obtenidos en cada experimento con el hierro fundido gris: \diamond experimento 1, \square experimento 2, X experimento 3, Δ experimento 4	85
41.	Datos obtenidos en cada experimento con la aleación de acero EN24: \diamond experimento 1, \square experimento 2, X experimento 3, Δ experimento 4	86

42.	Modelo de entradas y salidas con ANFIS para el proceso de torneado	88
43.	Funciones de pertenencia para el caso del material hierro fundido FG15	91
44.	Datos del desgaste de la herramienta de corte en el proceso de torneado del hierro fundido FG15	94
45.	Datos del desgaste de la herramienta de corte en el proceso de torneado del acero aleado EN24.....	98
46.	Fresado de un molde de aluminio	104
47.	Red neuronal artificial simple en la que cada círculo representa una neurona	106
48.	Proceso de fresado de moldes con la plataforma experimental	109
49.	Condiciones de cada uno de los ensayos	110
50.	Evolución del desgaste de los insertos utilizados en los ensayos de fresado del molde; VB es el desgaste de flanco	111
51.	Mecanismos de micro y macro astillado en un inserto de la herramienta de corte	112
52.	Señal de la corriente instantánea en amperios del servomotor del cabezal de la fresadora CNC; se toma como referencia la vuelta 34.	113
53.	Potencia demandada por la fresadora CNC en uno de los ensayos de mecanizado de moldes	114
54.	Evolución del par torsor en Nm del cabezal de la fresadora	114
55.	Señal de corriente en el servomotor del cabezal con velocidad de corte 80 m/min y profundidad de 1 mm	116
56.	Señal de corriente en el servomotor del cabezal con velocidad de corte 120 m/min y profundidad de 2 mm	117
57.	Velocidad instantánea (U/min.) de avance del eje x o longitudinal de la fresadora CNC ante los estados de la herramienta de corte	118

58.	Señal de corriente del servomotor del cabezal de la fresadora CNC ante los estados de la herramienta de corte	119
59.	Arquitectura del proceso para el usuario final.....	121
60.	Arquitectura de la red neuronal resultante en la predicción del desgaste de la herramienta de corte.....	122
61.	Comparación entre el desgaste real y el predicho por la red neuronal.....	124
62.	Comparación entre el desgaste real y el predicho por la red neuronal.....	124
63.	Curva genérica para la confiabilidad.....	127
64.	Relación entre el desgaste de la herramienta y el tiempo de corte	129
65.	Diagrama Causa-Efecto para el proceso de taladrado	131
66.	Desgaste de flanco y de cráter en brocas.....	132
67.	Cuerpo de prueba de acero	134
68.	Procedimiento para establecer el desgaste de flanco en una broca determinada, después de 35 agujeros.....	136
69.	Evolución del desgaste de flanco para las 10 brocas, en función del número de agujeros	137
70.	Funciones de densidad de probabilidad en función del número de agujeros realizados: a) 20 y 25; b) 30 y 35; c) 40 y 45.	138
71.	Función de densidad de probabilidad en función del tiempo al alcanzar el V_B admisible.....	140
72.	Confiabilidad de la broca en función del tiempo de taladrado.....	141
73.	Montaje del microscopio portátil sobre el torno.....	149
74.	Medición del desgaste de flanco en la herramienta de corte de carburo de tungsteno.....	149
75.	Gráficas logarítmicas π_2 vs π_1 para cada tipo de herramienta de corte empleada en el estudio.....	152
76.	Centroides para: a) HSS; b) S-HSS; c) WC; d) WIDIA	154

77.	Esquema ilustrativo del uso apropiado e inadecuado de las herramientas de corte	158
78.	Bujes de bronce de distintos tamaños.....	162
79.	Engrane helicoidal.....	163
80.	Torno CNC horizontal FEMCO HL-35 DMSY.....	164
81.	Dinamómetro digital marca TYP instruments	173
82.	Sensores dinamométricos	175
83.	Diagrama de Flujo de Caja para el monitoreo con SPFO	181
84.	Cálculo de la TIR del monitoreo con SPFO.....	183
85.	Diagrama de Flujo de Caja del monitoreo inteligente del proceso de torneado	185
86.	Cálculo de la TIR para el monitoreo inteligente del proceso de torneado	186
87.	Diagrama de Flujo de Caja para el monitoreo del fresado de moldes en tiempo real	189
88.	Cálculo de la TIR para el monitoreo del fresado de moldes en tiempo real	190

TABLAS

I.	Condiciones de corte en las operaciones de torneado llevados a cabo	84
II.	Valores de TAE para los experimentos con el hierro fundido FG15... 102	
III.	Valores de TAE para los experimentos con aleación de acero En24. 102	
IV.	Grupo de descriptores seleccionado para identificar el estado de la herramienta de corte o fresa	123
V.	Análisis de modos y efectos de las fallas para el desgaste de la broca	133

VI.	Condiciones de operación del ensayo de taladrado efectuado en el estudio	135
VII.	Valores de confiabilidad de la broca cuando el desgaste de flanco es de 120 μm	140
VIII.	Propiedades físicas y mecánicas de los materiales de las piezas de trabajo	151
IX.	Precios de buriles y fresas verticales.....	169
X.	Precios y características de los componentes para el monitoreo con SPFO	170
XI.	Precios y características de los componentes para el monitoreo inteligente del proceso de torneado.....	171
XII.	Precios y características de los componentes para el monitoreo del fresado de moldes en tiempo real.....	174
XIII.	Datos para el cálculo de la TIR para el monitoreo con SPFO.....	180
XIV.	Datos para el cálculo de la TIR del monitoreo inteligente del proceso de torneado.....	184
XV.	Datos para el cálculo de la TIR del monitoreo del fresado del moldes en tiempo real.....	188
XVI.	Resumen comparativo de los métodos de monitoreo del desgaste en herramientas de corte	191

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Al	Aluminio
A	Amperios
C	Carbono
Co	Cobalto
GND	Conexión a tierra
CD	Corriente directa
Cr	Cromo
dB	Decibeles
F	Fuerza
°C	Grados centígrados
°F	Grados Fahrenheit
KHz	Kilohertz (frecuencia de señal)

kW	Kilowatts
MPa	Megapascales
mA	miliamperios
Nm	Newton-metro, medida del par torsor
N	Nitrógeno
O	Oxígeno
Rx	Recepción de señal
rpm	Revoluciones por minuto
Ti	Titanio
Tx	Transmisión de señal
W	Tungsteno
v	Velocidad
V	Voltaje
VDC	Voltaje de corriente directa
Vi	Voltaje de entrada

Vo

Voltaje de salida

GLOSARIO

Afinidad química	Tendencia de un átomo o de un compuesto para combinarse por medio de una reacción química con átomos o compuestos de composición distinta
Agua taladrina	Fluido refrigerante sintético, de color amarillo claro y de composición química no aceitosa que contiene aditivos antioxidantes. Se aplica como refrigerante en sierras, en la rectificación de materiales ferrosos y en el afilado de herramientas
AISI	Instituto Estadounidense del Hierro y el Acero, por sus siglas en inglés
Analizador de redes	Equipo programable de medición de redes eléctricas, el cual puede medir los siguientes parámetros: corriente por fase, voltaje entre fases, factor de potencia, armónicas, potencia activa y potencia reactiva.
ASPEN Neural SIM	Software para la simulación de procesos de manufactura diseñado por la empresa estadounidense ASPEN

Austenita	Es la más suave de todas las composiciones del acero. Se obtiene al calentar la pieza de acero exactamente a 723 °C
Buje	Elemento de máquina fabricado usualmente de bronce, el cual sirve de apoyo para que un eje gire
Centro de masa	Punto geométrico de un cuerpo que actúa dinámicamente como si en él estuviese aplicada la resultante de las fuerzas externas a ese cuerpo
Centroide	Centro de masa de un cuerpo con densidad uniforme
Choques térmicos	Se refiere al rompimiento de algún material al sufrir un cambio drástico de temperatura. Sucede al quebrarse un material sólido debido a un aumento o descenso brusco de temperatura
Desviación estándar	Distribución de probabilidad, es la desviación de una variable aleatoria con respecto a la media
DIN	Instituto Alemán de Normas, por sus siglas en alemán
Dinamómetro	Instrumento utilizado para medir fuerzas o pesar objetos
Dureza	Resistencia u oposición que ofrece un material a la penetración

Emulsionante	Aditivo que facilita el proceso de emulsión de sustancias; una emulsión es una mezcla más o menos homogénea de líquidos inmiscibles (que no se pueden mezclar)
Engrane	Rueda dentada que se emplea para la transmisión de potencia mecánica
Esfuerzo	En ingeniería, se define como el resultado de la división de la carga axial aplicada a un elemento entre el área transversal de ese elemento
Fibra óptica	Hilo flexible de vidrio o plástico transparente, capaz de conducir en su interior un rayo de luz, ya sea un haz de láser o luz infrarroja, que proviene de una fuente luminosa
Fuerza cortante	Se produce con dirección perpendicular al eje de una viga al aplicarse cargas perpendiculares al eje de la misma viga; su efecto es similar al de una tijera cortando una hoja de papel
Fuerza normal	Se define como la fuerza que ejerce una superficie sobre un cuerpo apoyado sobre la misma
HRc (dureza Rockwell)	Método para determinar la dureza de un material. Consiste en un ensayo de penetración del material realizado con bolas de acero o con un cono de diamante (en el caso de los materiales más duros).

HSS	Acero rápido para herramienta de corte
HSS-Co	Acero rápido para herramienta de corte con cobalto
HSS-W	Acero rápido para herramienta de corte con tungsteno
Instrumentos MTI	Sensores y transductores láser de aplicación industrial
ISO	Organización Internacional de Estándares, por sus siglas en inglés
Límite de fluencia	Es el punto en el diagrama esfuerzo-deformación de un material dúctil, en el que se observa una deformación significativa del material, sin la aplicación respectiva de un esfuerzo proporcional; para fines prácticos, el límite de fluencia determina la utilidad de un material
Lupa estereoscópica	Es un aparato, también conocido como microscopio estereoscópico, que permite la observación y estudio de muestras, con imágenes tridimensionales; suele disponer de una cámara digital para la toma de imágenes
Martensita	Es la composición más dura y frágil del acero. Se obtiene al enfriar muy rápido la austenita

Máquinas-Herramientas	Tipo especial de máquina que se emplea para dar forma a materiales sólidos, principalmente metales. Por ejemplo: los tornos, fresadoras y taladros de columna son llamados máquinas-herramientas.
Matlab	Es un lenguaje de alto nivel y ambiente interactivo para cálculos numéricos, visualización y programación de computadoras. Por medio de Matlab se pueden analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos y aplicaciones.
Movimiento de avance	En máquinas-herramientas es el movimiento que es uniforme de la herramienta de corte, el cual produce una viruta continua
Movimiento principal	En las máquinas-herramientas es el movimiento que produce el efecto de corte; en el caso del torno, el movimiento principal la rotación de la pieza de trabajo; mientras que en el taladro de columna por ejemplo, el movimiento principal es la rotación de la herramienta de corte o broca
Norma DIN 66024	Norma del desarrollo de máquinas de control numérico computarizado (CNC), según la DIN; equivale a la norma ISO 6983
Norma ISO/DIS 3002	Norma que establece las partes de una herramienta de corte monofilos, productora de viruta; las partes definidas por esta norma son cara, flanco, filo y punta

Partículas duras	Partículas de ciertos materiales, como sílice, que al ser de mayor tamaño que la película más fina de lubricante en una zona de rozamiento, provocan desgaste abrasivo
Precisión	En instrumentación eléctrica es la característica que indica la máxima desviación entre valores de salida obtenidos al medir varias veces un mismo valor de entrada, con el mismo sensor y en idénticas condiciones ambientales
Profundidad	En el torneado de metales es la graduación de la herramienta de corte para obtener el espesor de viruta que se desee; también se le llama movimiento de penetración o de ajuste
Relación de Transmisión	Es la relación de velocidad entre dos o más engranes conectados; viene dada por la expresión $R = N_1 / N_2$, en la que N es el número de dientes de cada una de los engranes
Revenido	Tratamiento térmico aplicado a los metales, en el cual se elimina la fragilidad dada por la extrema dureza. Consiste en calentar el acero después del templado, a una temperatura menor al punto crítico, seguido de un enfriamiento controlado que puede ser rápido, cuando se desee mejorar la tenacidad del acero, o lento, cuando se deseen reducir las tensiones que causan deformaciones

Sinterizado	Proceso de soldar o conglomerar metales reducidos a polvo, sin necesidad de llegar a la temperatura de fusión
Templado	Tratamiento térmico en el cual se calienta el acero y luego se enfría bruscamente, con el objetivo de que el acero se endurezca; este tratamiento se basa en la formación de la martensita
Tenacidad	Propiedad de los materiales para resistir los esfuerzos de fatiga; en el caso de los metales indica la capacidad de estos de absorber grandes cantidades de energía antes del punto de ruptura
Velocidad de corte	En máquinas-herramientas es la velocidad con que se realiza el movimiento principal, al arrancar la viruta
Viruta	Fragmento de material residual con forma de lámina curva o espiral, el cual es extraído mediante herramientas de corte tales como: los buriles, fresas o brocas

RESUMEN

Este trabajo de graduación trata, primordialmente, del desgaste en herramientas de corte empleadas en máquinas-herramientas tales: como el torno, la fresadora, el taladro de columna, etc. Estas máquinas son empleadas en los procesos de mecanizado de metales.

En el primer capítulo se describe los conceptos fundamentales sobre desgaste en herramientas de corte, también sobre máquinas-herramientas (tipos, cálculos de velocidades de corte, movimientos de avance, etc.).

En el segundo capítulo se aborda la automatización en procesos de mecanizado de metales, la cual tiene su máxima expresión en las modernas máquinas-herramientas de Control Numérico Computarizado (CNC).

El tercer capítulo trata acerca del monitoreo del desgaste de una herramienta de corte de fresado vertical, empleando un sensor de fibra óptica (SPFO).

El cuarto capítulo describe un método para la evaluación del desgaste en herramientas de corte en el torneado, empleando para ello transductores que envían señales a un sistema llamado Anfis (monitoreo inteligente).

En el quinto capítulo se presenta un método para el monitoreo del fresado de moldes, en tiempo real, mediante señales eléctricas de corriente y potencia consumida en una fresadora CNC.

El sexto capítulo muestra un análisis del desgaste en brocas en procesos de taladrado de piezas de bajo contenido de carbono, mediante técnicas estadísticas de confiabilidad.

El séptimo capítulo aborda la evaluación del desgaste en buriles en procesos de cilindrado, definiendo para ello números adimensionales basado en las velocidades de corte, profundidad de corte, movimiento de avance, etc.

Finalmente, en el octavo capítulo se presenta un análisis económico de los distintos métodos de monitoreo del desgaste en herramientas de corte presentados en los capítulos tercero, cuarto y quinto; este análisis se realiza para determinar la aplicación de estos métodos de monitoreo en talleres de metal-mecánica del medio nacional.

OBJETIVOS

General

Presentar y analizar los métodos de evaluación del desgaste en herramientas de corte, los cuales emplean sensores, control inteligente y análisis de confiabilidad.

Específicos

1. Presentar los distintos tipos de desgaste que se presentan en herramientas de corte empleadas en máquinas-herramientas.
2. Mostrar la automatización de procesos de mecanizado de metales.
3. Dar a conocer el proceso del monitoreo del desgaste de una herramienta de fresado vertical empleando un sensor de proximidad.
4. Presentar la metodología para la evaluación del desgaste en herramientas de corte en procesos de torneado, mediante monitoreo inteligente.
5. Mostrar el monitoreo del fresado de moldes en tiempo real, mediante redes de señales internas.
6. Mostrar por medio de la técnica estadística de confiabilidad el desgaste en herramientas de corte en el proceso de taladrado.

7. Presentar mediante números adimensionales la evaluación del comportamiento de las herramientas de corte en el proceso de cilindrado.
8. Mostrar el análisis económico de los distintos métodos de monitoreo del desgaste en herramientas de corte en los procesos de mecanizado.

INTRODUCCIÓN

El desgaste en herramientas de corte es un factor de suma importancia en los procesos de mecanizado de metales. Hay fundamentos teóricos en el estudio de este desgaste, como los tipos de desgaste (de flanco y de cráter) y la anchura de estría V_B (la cual determina la vida útil de la herramienta).

La automatización en procesos de mecanizado de metales tiene su máxima demostración en las máquinas-herramientas de Control Numérico Computarizado (CNC). Las herramientas de corte empleadas en estas máquinas sufren esfuerzos notables al realizar los trabajos de mecanizado.

El análisis del desgaste en herramientas de corte empleadas en máquinas CNC se convierte en una tarea aún más compleja, debido a la cantidad y variedad de variables que presenta.

Debido a lo anterior, se emplean sensores, transductores y controles inteligentes para determinar el tipo y el nivel de desgaste en herramientas de corte empleadas en procesos como el torneado y fresado CNC.

Los controles inteligentes emplean técnicas propias de la inteligencia artificial; estos controles reciben datos de un proceso mediante sensores, procesan la información proveniente de estos y ejecutan las acciones sobre el proceso en cuestión mediante actuadores electromecánicos.

El análisis de confiabilidad es una técnica estadística empleada en controles de calidad. Por ejemplo, al aplicarse en el desgaste de una broca al taladrar, se mide la cantidad de agujeros y la precisión en los diámetros de los mismos, además del acabado superficial en la pieza de trabajo.

Los parámetros adimensionales suelen ser funciones que representan a un fenómeno físico o a un proceso determinado. Estos parámetros tienen la ventaja de facilitar el análisis de un problema, ya que reducen el número de variables al agruparlas en una misma función. Al aplicar los parámetros adimensionales en el análisis del desgaste en herramientas de corte se agrupan: V_B , velocidades de corte, longitud torneada, tiempo de pasada, etc. en dos funciones.

En el medio nacional, la mayoría de talleres de metal-mecánica fabrican piezas de una en una, no en serie. Aunado a esto, hay una limitante económica importante, ya que la instrumentación eléctrica, el equipo de cómputo y software requeridos son inevitablemente caros. Un análisis económico (tal como el cálculo del VPN y la TIR) determina la viabilidad económica de los métodos de monitoreo de desgaste presentados.

1. CONCEPTOS SOBRE DESGASTE, HERRAMIENTAS DE CORTE Y MÁQUINAS-HERRAMIENTAS

1.1. Definición de fricción

La fricción o rozamiento es la fuerza que se opone a la tendencia al movimiento de los cuerpos sobre una superficie. Se debe, entre otras cosas, a la existencia de pequeñas irregularidades en las superficies de contacto.

La fricción es la causa principal del desgaste en componentes mecánicos de las máquinas, así como en herramientas de corte empleadas en máquinas-herramientas.

1.1.1. Fricción estática

Es la que actúa sobre cuerpos en reposo y siempre equilibra a las fuerzas que tienden a poner en movimiento a los cuerpos; se denota por f_e . Esta fricción es variable y cuando alcanza su valor máximo, f_{eM} , el cuerpo en cuestión empieza a moverse.

El máximo valor de fricción estática viene dado así:

$$f_{eM} = \mu_e N$$

Donde: μ_e es el coeficiente de fricción estática entre las superficies y N es la fuerza normal.

1.1.2. Fricción cinética

Es la que actúa sobre un cuerpo cuando este ya está en movimiento, oponiéndose siempre a su desplazamiento. Se denota por f_c y su valor es menor que el máximo valor de la fricción estática f_{eM} ; o sea, el valor de la fuerza de fricción disminuye al iniciarse el movimiento.

La fricción cinética viene dada así:

$$f_c = \mu_c N$$

Donde: μ_c es el coeficiente de fricción cinética. El valor de f_c es prácticamente constante (no depende de la velocidad del cuerpo).

El valor de μ_c depende de los mismos factores que afectan a μ_e y para dos superficies en contacto dadas, $\mu_c < \mu_e$. Por lo general, los valores de μ_c y de μ_e son menores que uno.

1.2. Definición y tipos de herramientas de corte

Las herramientas de corte, que serán objeto de estudio, son aquellas que se emplean en máquinas-herramientas, provocando un arranque de viruta continuo.

Las herramientas de corte tienen una parte cortante (o elemento productor de viruta) y un cuerpo. Son empleadas comúnmente en máquinas-herramientas.

Son deseables las siguientes características en una herramienta de corte:

- Resistencia al desgaste
- Conservación del filo a altas temperaturas
- Tenacidad
- Bajo coeficiente de fricción
- Alta resistencia a los choques térmicos

Se les conocen como herramientas de corte monofilo a aquellas que constan de una parte cortante (elemento productor de viruta) y un cuerpo.

Según la Norma ISO/DIS 3002, los útiles monofilos tienen las partes siguientes:

- Cara: sobre su superficie fluye la viruta
- Flanco o superficie de incidencia: frente a él pasa la viruta generada en la pieza
- Filo: esta es la parte que realiza el corte y se divide en primario (cuya superficie ataca transitoriamente en la pieza) y secundario (este es el resto del filo).
- Punta: es la parte del filo en la que se cortan los fillos principales y secundarios.

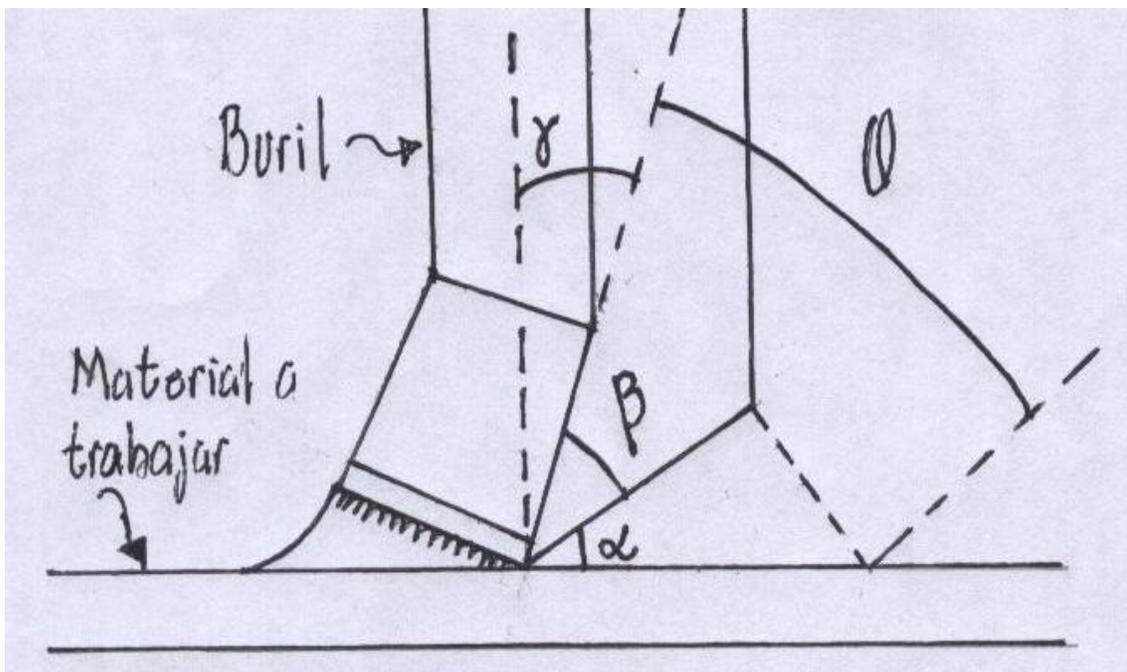
En el afilado de estas herramientas es necesario controlar los ángulos de incidencia y de salida de viruta, de acuerdo con el material que se vaya a mecanizar. Estos valores son recomendaciones de los fabricantes y cumplen una función orientativa.

Los principales ángulos para el trabajo de corte de una pieza por medio de una herramienta son:

- Ángulo de incidencia α : evita la fricción entre el cuerpo de la herramienta de corte y el material
- Ángulo de ataque γ : es por donde fluye la viruta
- Ángulo de filo β
- Ángulo de corte θ

En la figura 1 se muestran estos ángulos en una herramienta de corte.

Figura 1. **Ángulos en una herramienta de corte: $90^\circ = \alpha + \beta + \theta$.**



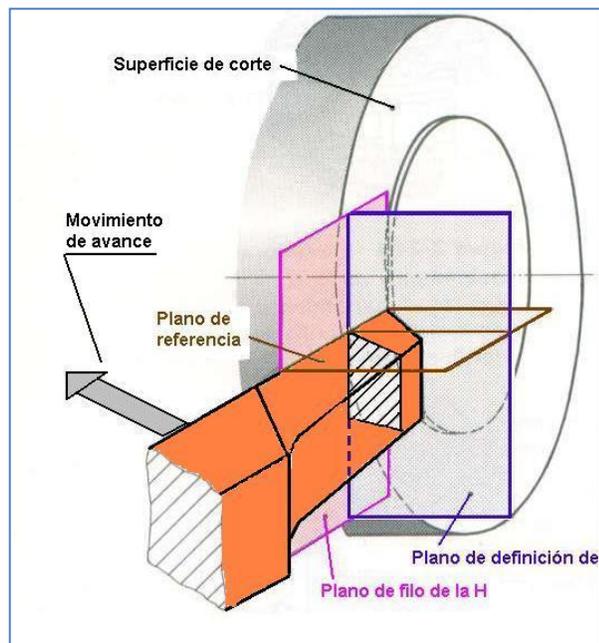
Fuente: HEINRICH Gerling. *Alrededor de las máquinas-herramientas*. p. 13.

La magnitud de los ángulos depende de lo siguiente:

- Del material de la pieza a trabajar: los materiales de viruta larga requieren de un ángulo de ataque grande y los de viruta corta requieren de uno pequeño.
- Del procedimiento de trabajo o del tipo de herramienta: torneado, fresado, taladrado, escariado, desbastado, afinado, etc.
- Material de la herramienta: los metales duros requieren, por lo general, ángulos de ataque más pequeños que los aceros rápidos.

Se muestran en la figura 2 aspectos geométricos de un buril al efectuar el trabajo de corte sobre una pieza.

Figura 2. **Planos y movimiento del buril en el corte**



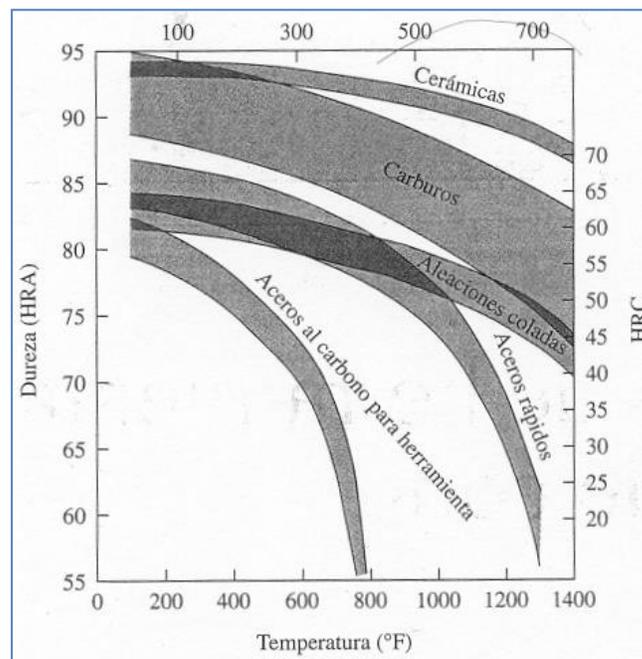
Fuente: <http://produccion.cps.unizar.es>. Consulta: 5 de julio de 2011.

En la actualidad, casi todas las herramientas de corte están hechas de aceros rápidos (HSS, High Speed Steel). Estos son aceros aleados y su composición incluye tungsteno, molibdeno, vanadio y cromo. El acero al carbono, prácticamente ya no se usa en la fabricación de herramientas de corte.

En la figura 3 se muestra una gráfica comparativa de dureza vs temperatura para distintos tipos de materiales empleados para fabricar herramientas de corte.

Figura 3. **Gráfica dureza vs temperatura para materiales empleados en herramientas de corte**

Los números de dureza Rockwell se indican por HR; HRA y HRC indican la escala de medición.

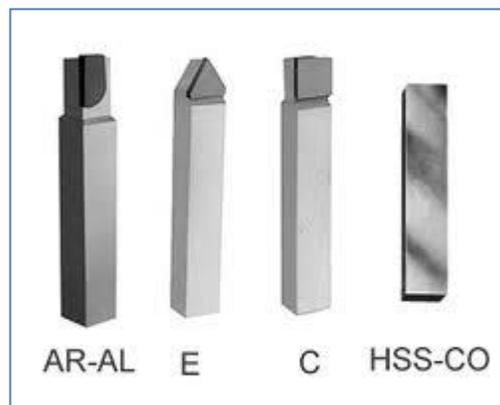


Fuente: <http://produccion.cps.unizar.es>. Consulta: 5 de julio de 2011.

1.2.1. Buriles

Los buriles son herramientas de corte empleadas en tornos. En la figura 4 se muestran distintos tipos, los cuales se distinguen fundamentalmente por el material del que están fabricados. De los mostrados, el más común es el HSS-Co.

Figura 4. **Distintos tipos de buriles empleados en tornos**



Fuente: www.retefer.com. Consulta: 12 de febrero de 2013.

Según la aleación HSS de la que están compuestos, se clasifican así:

- HSS de primera generación: empleados en tornos antiguos.
- HSS-Co de segunda generación: el cual en su composición incluye cobalto, que proporciona una extrema dureza. Estas herramientas son empleadas en tornos modernos.

Los buriles pueden estar fabricados en su cuerpo de un material barato y tener en el filo un material HSS.

Otra forma de clasificar a los buriles, respecto a su uso, es de la siguiente forma:

- Para desbaste: pueden ser derechos o izquierdos, rectos o curvos
- Para afinado: pueden ser puntiagudos o cuadrados
- De corte lateral: hay derechos e izquierdos. Se emplean para refrentar y torneare entrantes y salientes, formando esquinas marcadas
- De forma: pueden ser de corte, de forma curva, de roscar o de desbaste interior

Mediante el torneado se obtienen, preferentemente, piezas cilíndricas, tales como:

- Ejes
- Pernos
- Roscas

1.2.2. Fresas

Son herramientas de corte de forma circular, de corte múltiple. Dispone de varios filos y el trabajo de producir viruta se distribuye en cada uno de ellos. Cada filo de la fresa no corta continuamente.

Los dientes cortantes de las fresas pueden ser rectilíneos o helicoidales, de perfil recto o formando un ángulo determinado.

El número de dientes de una fresa depende del diámetro y tipo de la misma, de la dureza del material a trabajar y de la cantidad de viruta a arrancar. En la figura 5 se muestra una fresa de perfil constante.

Figura 5. **Fresa de módulo de perfil constante**



Fuente:http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/4c/Fresa_de_m%C3%B2dul.JPG. Consulta: 12 de febrero de 2013.

Los tipos de fresas son:

- Cilíndricas: su forma de trabajar es similar a una broca, pero no perforan sino que mecanizan ranuras y tienen un poder de corte mayor. En la figura 6 se muestran algunas fresas de este tipo.

Figura 6. **Fresas cilíndricas**



Fuente:<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e6/MillingCutterSlotEndMillBallnose.jpg>. Consulta: 12 de febrero de 2013.

Circulares: las cuales tienen forma de disco con un agujero central que se acopla al eje portafresas. Suelen ser de acero rápido y la forma de los dientes permite que corten tanto frontal como lateralmente, al mismo tiempo. En la figura 7 se muestra una fresa circular o de disco.

Figura 7. **Fresa circular o de disco**



Fuente:<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/72/MillSideAndFaceCutter.jpg/150px-MillSideAndFaceCutter.jpg>. Consulta: 12 de febrero de 2013.

- Circulares de perfil constante: los dientes de este tipo de fresas están tallados con una geometría especial, ya sea con radios o perfil de los dientes adecuados para mecanizar diferentes tipos de engranajes. La fresa mostrada en la figura 5 es de este tipo.
- Fresas de plato: son tal vez las de mayor aplicación en talleres de mecánica industrial, especialmente en la fabricación de piezas cúbicas. En la figura 8 se muestra una fresa de este tipo.

Figura 8. **Fresa de plato**



Fuente:http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b2/Plat_de_planejar.JPG/220px-Plat_de_planejar.JPG. Consulta: 6 de julio de 2011.

1.2.3. **Brocas**

Las brocas son las herramientas de corte empleadas en los taladros y los barrenos. Con ellas se realizan agujeros en las piezas a trabajar; tienen una geometría que depende de la finalidad con la que hayan sido fabricadas. En la figura 9 se muestran brocas helicoidales.

Figura 9. **Brocas helicoidales**



Fuente:<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/53/Bohrer.jpg/220px-Bohrer.jpg>. Consulta: 6 de julio de 2011.

1.3. Desgaste en herramientas de corte

El desgaste en una herramienta de corte es inducido por los siguientes factores:

- Grandes esfuerzos localizados
- Altas temperaturas de operación
- Deslizamiento de la viruta por la superficie de ataque
- Deslizamiento de la herramienta por la superficie a mecanizar

El desgaste en una herramienta de corte es un proceso gradual; depende del material de trabajo, de la forma de la herramienta de corte y del avance, profundidad y velocidad de corte; además influyen las características de la máquina-herramienta.

Existen dos formas de desgaste en estas herramientas, los cuales son:

- Desgaste de flanco: se presenta en la superficie de incidencia y se atribuye al frotamiento de la herramienta de corte sobre la superficie mecanizada. Este frotamiento causa desgaste abrasivo y/o adhesivo y alta temperatura.
- Desgaste de cráter: se presenta en la superficie de ataque de la herramienta y afecta al proceso de corte, ya que cambia la geometría de la intercara entre viruta y herramienta.

Se debe señalar que el desgaste de flanco afecta las dimensiones finales de la pieza y el acabado superficial, además de provocar temperaturas elevadas en el proceso de mecanizado.

En el desgaste de cráter, los factores más importantes son la temperatura, en la intercara entre la herramienta y la viruta, y la afinidad química entre el material de la herramienta y el de la pieza a mecanizar.

El desgaste en herramientas de corte, en función del mecanismo que lo produce en el mecanizado de piezas, se clasifica así:

- Desgaste abrasivo: es el daño causado por la acción de partículas sólidas presentes en la zona de rozamiento; se asocia a la acción de partículas duras.
- Desgaste adhesivo: es el proceso por el cual se transfiere material de una superficie a otra durante su movimiento relativo, como resultado del soldado en frío en puntos de interacción de asperezas; se asocia a los esfuerzos de cizalla.
- Desgaste por difusión: se debe a las altas temperaturas alcanzadas en el mecanizado.
- Desgaste por fractura: se debe a los esfuerzos de fatiga.

Estos mecanismos de desgaste ocurren simultáneamente durante el proceso de mecanizado; sin embargo, siempre hay un mecanismo dominante que dependerá de las condiciones de corte, el material de la pieza a trabajar y de la geometría de la herramienta de corte.

La evolución del desgaste en la herramienta dependerá, principalmente de la velocidad de corte, el espesor de la viruta no deformada y una combinación de los mecanismos de desgaste antedichos.

A bajas velocidades de corte, por ejemplo, el filo de la herramienta se desgasta redondeando su perfil y perdiendo así el filo.

Sin embargo, al aumentar la velocidad de corte el modo de desgaste se modifica y adquiere importancia el límite de fluencia.

Las velocidades medias de corte producen desgaste de flanco y muescas en el filo de la herramienta; las velocidades altas de corte producen, principalmente cráteres y las velocidades excesivamente altas producen desgaste por deformaciones plásticas y arranque de material o roturas parciales.

El desgaste en la punta de la herramienta depende casi completamente de las condiciones de corte; a velocidades de corte altas el borde se deforma plásticamente y esto puede causar la pérdida total de la punta misma.

Se debe señalar también, que el desgaste de flanco tiene un incremento alto, al estar la herramienta de corte afilada, en el inicio del mecanizado de piezas; luego, tiene un incremento lineal y al final de la vida útil de la herramienta, tiene un incremento aún más notorio.

Las muescas en la herramienta de corte se deben, principalmente a la abrasión y posibilitan la aceleración de reacciones químicas, como la oxidación.

Existen tres posibles fallas en herramientas de corte, las cuales son:

- Falla por fractura: ocurre cuando la fuerza de corte es excesiva en la punta de la herramienta.
- Falla por temperatura: ocurre cuando la temperatura es demasiado alta para el material de la herramienta, causando que se ablande la punta, deformación plástica y pérdida de filo en el borde.

- Desgaste gradual: conforme el uso se ocasiona la pérdida de la forma de la herramienta, reducción de la eficiencia del corte, desgaste acelerado y falla final.

1.4. Vida útil de la herramienta de corte

Como ya se mencionó, durante el proceso de mecanizado la herramienta de corte se desgasta y finalmente deja de trabajar satisfactoriamente, causando lo siguiente:

- Pérdida de precisión dimensional.
- Mayor rugosidad y consumo de potencia de la máquina-herramienta.

La tasa de desgaste depende de la temperatura de la herramienta, la cual, a su vez, depende de la velocidad de corte, el tipo, la geometría y la dureza del material de la herramienta y la condición del material de la pieza a trabajar.

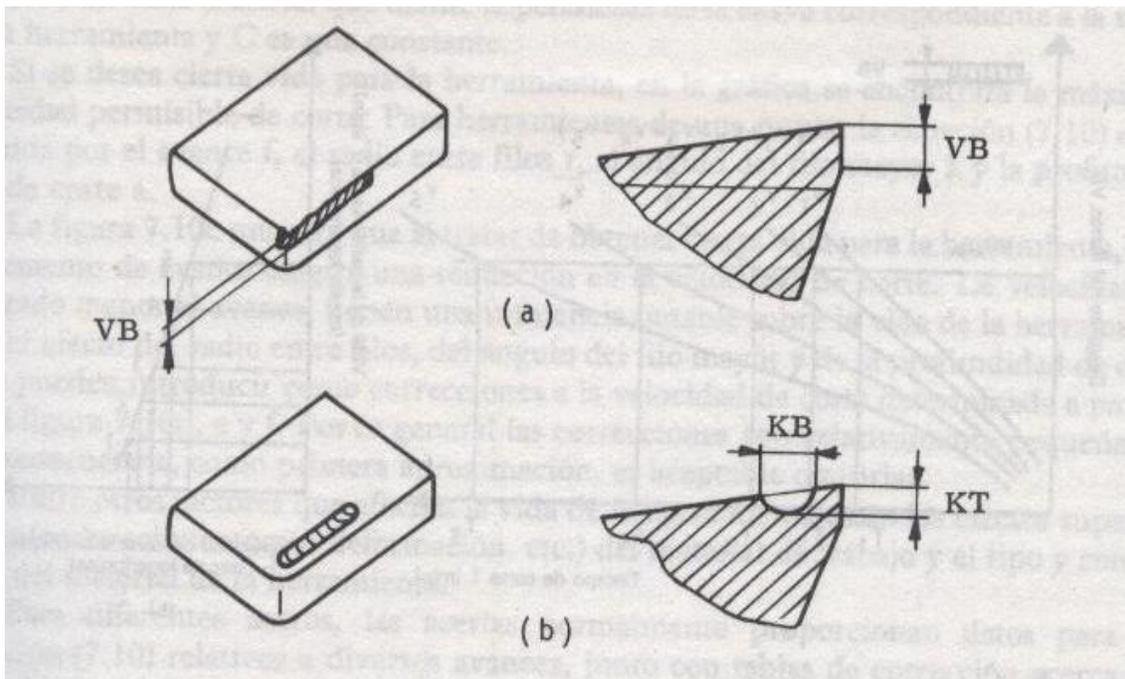
En la mayoría de casos la herramienta de corte falla ya sea por el desgaste gradual de flanco o de cráter; por sobrecalentamiento, astillas en el filo, deformación plástica y fisuras térmicas.

El desgaste de flanco se mide por la anchura de estría VB y el desgaste de cráter se mide por la profundidad KT y la anchura KB del cráter.

La estimación de la vida útil de la herramienta de corte (según el criterio de desgaste o de falla), se puede definir de acuerdo al valor máximo que alcance la anchura de estría VB en el desgaste de flanco (VB máx.) o al valor mínimo del desgaste de cráter (KT y KB máx.).

En la figura 10, VB es la anchura de la zona de desgaste, KB y KT son la anchura y profundidad de cráter, respectivamente.

Figura 10. **Desgaste de flanco (a) y de cráter (b) en la herramienta de corte**



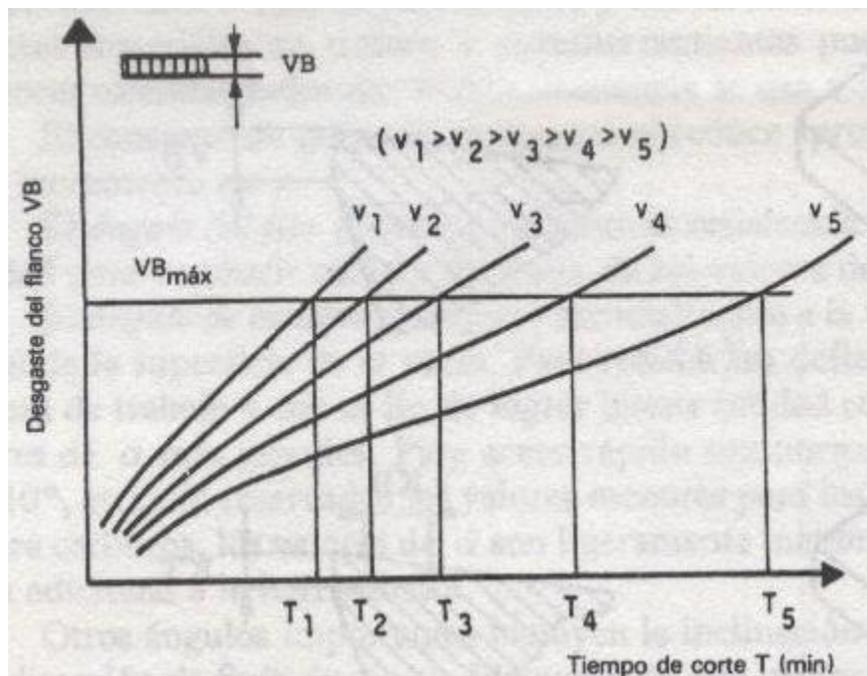
Fuente: ALTING, Leo. *Procesos Para Ingeniería de Manufactura*. p. 185.

El valor VB se emplea predominantemente como criterio de desgaste, pero a altas velocidades de corte en el mecanizado de piezas que forman una viruta continua, suele incluirse el desgaste de cráter.

La manera en que varía el desgaste de flanco con el tiempo es muy importante, ya que determina las condiciones óptimas de corte (desde un punto de vista económico).

En la figura 11 se muestra una gráfica del desgaste de flanco vs el tiempo de corte T a diferentes velocidades de corte (de v_1 a v_5), para valores fijos de geometría de la herramienta, avance, profundidad de corte y radio entre filos.

Figura 11. **Ancho del desgaste de flanco en función del tiempo de corte a distintas velocidades**



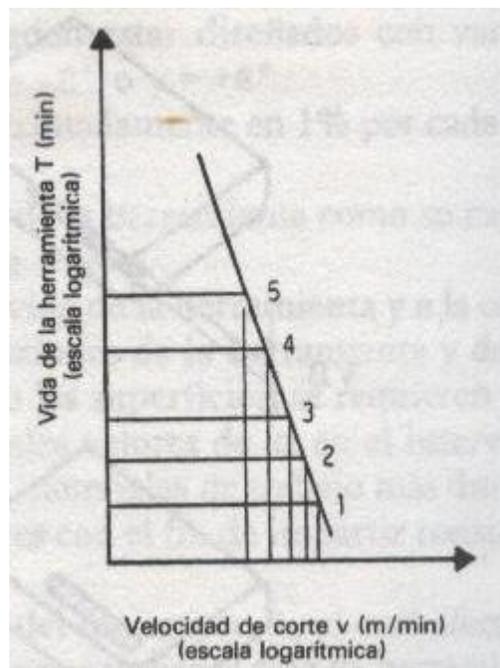
Fuente: ALTING, Leo. *Procesos Para Ingeniería de Manufactura*. p. 186.

Según el criterio del desgaste de flanco, puede observarse en la figura 11 que al aumentar las velocidades de corte disminuye la vida útil de la herramienta de corte hasta el punto en el que falla.

El tiempo transcurrido hasta obtener $VB = VB_{m\acute{a}x}$ se llama vida de la herramienta de corte T, y corresponde a la velocidad de corte v.

Una gráfica logarítmica de la vida de la herramienta de corte vs la velocidad de corte, normalmente muestra una línea aproximadamente recta dentro del intervalo práctico de velocidades de corte. Esto se muestra en la figura 12.

Figura 12. **Gráfica vida de la herramienta de corte vs la velocidad de corte en escala logarítmica**



Fuente: ALTING, Leo. *Procesos Para Ingeniería de Manufactura*. p. 186.

Las líneas rectas mostradas en la figura 11 se pueden expresar mediante la ecuación de Taylor:

$$vT^{-1/k} = C$$

T es la vida de la herramienta de corte, v es la velocidad de corte, k y C son parámetros que dependen del movimiento de avance, la profundidad de corte, el material de la pieza de trabajo y el de la herramienta de corte. Si se desea cierta vida para la herramienta de corte, en la figura 12 se puede encontrar la máxima velocidad de corte permisible.

Otros factores que afectan la vida de la herramienta de corte son:

- Efectos superficiales
- Material de la pieza de trabajo
- Condiciones del material de la herramienta

Para prevenir la rotura del filo, la herramienta de corte se debe afilar cada cierto número de horas de uso, dependiendo del tipo de mecanizado.

1.5. Recubrimientos PVD en herramientas de corte

PVD (Physical vapor deposition o deposición física de vapor, por sus siglas en inglés) es un grupo de técnicas de vaciado, usadas para depositar finas películas de recubrimientos que realzan las propiedades y el desempeño de herramientas y componentes de maquinaria.

Los recubrimientos PVD se emplean en:

- Herramientas de corte
- Implantes médicos
- Componentes de autos de fórmula 1

En este trabajo interesa la aplicación de los recubrimientos PVD en la fabricación de herramientas de corte.

Se considera que la introducción de los recubrimientos PVD en herramientas de corte es uno de los avances más importantes en la tecnología de los recubrimientos en los últimos 30 años.

El primer recubrimiento PVD en tener una aplicación comercial en herramientas de corte fue el nitruro de titanio (TiN), a principios de los años ochenta.

El TiN se empezó a usar en herramientas de corte HSS debido a que este recubrimiento podía aplicarse sobre el HSS a temperaturas por debajo de los 500 grados centígrados, temperatura en la cual el HSS empieza a suavizarse. El TiN es un revestimiento cerámico muy resistente al desgaste y aplicable en situaciones en las que se requiere que la herramienta de corte sea duradera y opere a velocidades elevadas, removiendo bastante viruta. Es de color dorado.

Actualmente, el nitruro de titanio-aluminio (TiAlN) es el revestimiento PVD más utilizado en herramientas de corte, superando en desempeño al TiN. El color del TiAlN depende de la razón entre el titanio y el aluminio presentes en el compuesto; puede ser desde negro hasta color bronce.

El rango de operación del TiAlN es de unos 800 grados centígrados. Al calentarse en presencia del aire se forma en él una capa delgada de óxido de aluminio, la cual protege al recubrimiento de oxidaciones adicionales.

En algunas otras aplicaciones, el nitruro de titanio-carbono (TiCN) y el nitruro de cromo (CrN) ofrecen mejores soluciones que el TiAlN.

Entre las ventajas de los recubrimientos PVD están:

- Economía: se incrementa la vida y la productividad de las herramientas.
- Velocidades de operación más altas.
- Reducción del desgaste: se reducen el desgaste abrasivo y de flanco en la herramienta de corte; también se reduce el desgaste de cráter, que se produce por la interacción química entre la viruta producida en el corte y la superficie de la herramienta.
- Se reduce la necesidad de emplear fluidos lubricantes: los recubrimientos PVD, como el TiAlN, tienen una extraordinaria estabilidad térmica, dureza en caliente y resistencia a la oxidación. Por lo tanto, se requiere menos lubricante en la operación de corte.
- Estabilidad dimensional de las herramientas de corte: es posible una aplicación de capa por debajo de la temperatura de revenido o templado (como ya se mencionó, las temperaturas a las que se realiza el recubrimiento se encuentran entre 200-500 grados centígrados), lo que a su vez, permite una alta estabilidad dimensional de la herramienta de corte. Estos recubrimientos pueden aplicarse una y otra vez sobre la herramienta.

1.6. Funcionamiento de las máquinas-herramientas

Las máquinas-herramientas pueden ser controladas, ya sea manual o automáticamente.

Actualmente, las máquinas CNC (Control Numérico Computarizado) pueden repetir secuencias una y otra vez con gran precisión, permitiendo la fabricación de piezas complejas.

Independientemente de la manera en que se controlen estas máquinas, todas realizan su labor mediante un útil o herramienta de corte convenientemente afilada o perfilada; al poner en contacto el material a trabajar con este útil, se produce en el primero un cambio de forma y de dimensiones por medio del arranque de viruta o por una simple deformación.

La elección de la máquina-herramienta a utilizar se hace de acuerdo a lo siguiente:

- Aspecto de la superficie que se desea obtener
- Dimensiones de la pieza a maquinar
- Cantidad de piezas a producir
- Precisión requerida

Se debe señalar que las máquinas-herramientas se distinguen, principalmente, por las funciones que desempeñan y por el tipo de piezas que pueden producir.

También se suelen dividir por los movimientos que realizan para el maquinado de las piezas.

Los tipos de máquinas-herramientas son:

- Desbastadoras: dan forma a la pieza por el arranque de viruta.

- Prensas: dan forma a las piezas por medio del corte, el prensado o el estirado.
- Especiales: para dar forma a las piezas emplean el láser, ultrasonidos, plasma, etc.

1.6.1. Torno

El torno es la máquina-herramienta fundamental en los talleres de metal-mecánica. Se utiliza para dar forma a una pieza de metal o madera haciéndola girar contra un dispositivo de corte que permanece fijo.

El torno de puntas es el más común y sus partes principales son:

- Bancada: sirve de soporte para las otras unidades del torno.
- Cabezal fijo: en él se coloca la pieza a trabajar y recibe el movimiento de rotación, a través de engranajes o poleas, proveniente de un motor eléctrico. Incluye también el selector de velocidad.
- Contrapunto: es un elemento que sirve de apoyo para colocar las piezas que son torneadas entre puntos. Para taladrar o escariar se coloca en él la herramienta de corte.
- Carro portaburil: consta del carro principal, el cual produce los movimientos de pasada y del carro transversal, que se mueve sobre el carro principal.

Entre los accesorios empleados en el torno están la luneta fija (empleada para sujetar ejes o tubos en trabajos de rectificación) y la luneta móvil (la cual evita el pandeo de los ejes y permite una medida constante en el corte). En la figura 13 se muestra un torno de puntas moderno.

Figura 13. **Torno de puntas moderno**



Fuente:http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/68/HwacheonCentreLathe_460x1000.jpg/777px-HwacheonCentreLathe_460x1000.jpg. Consulta: 10 de marzo de 2013.

En un torno, el buril tiene el movimiento de avance (longitudinalmente sobre la pieza a trabajar), el cual produce un arranque de viruta continuo. El movimiento principal es la rotación de la pieza a trabajar.

Se suelen clasificar los tornos con base en lo siguiente:

- Largo de la bancada y el volteo
- Por su robustez
- Tipo de rosca
- El voltaje

Los movimientos de ajuste de la herramienta de corte en el torno se realizan a mano, en el carro portaburil.

1.6.1.1. Velocidad de corte en el torneado

Un aspecto muy importante en los procesos de metal-mecánica es la velocidad de corte, la cual en el caso del torneado, se define como la velocidad a la que se mueve la pieza contra el buril al arrancar la viruta. Es una medida de la rapidez del movimiento de corte. Viene dada así:

$$v = \pi d N * (1/1000) \text{ m/min}$$

N es el número de revoluciones y d es el diámetro de la pieza a trabajar. El tiempo de pasada viene dado así:

$$t = L / N a \text{ min}$$

L es la longitud torneada y, a es el movimiento de avance que produce arranque de viruta continuo.

La velocidad de corte está influida por los factores siguientes:

- Material de la pieza: los materiales duros desarrollan en el arranque de viruta más calor que los materiales blandos; por esta razón los materiales duros se deben trabajar a velocidades de corte menores que los materiales blandos.
- Material de la herramienta: en la herramienta de corte el material duro soporta más calor que los aceros rápidos y por esta razón permite el empleo de velocidades de corte mayores.

- Sección de viruta: al torneear con virutas pequeñas (por ejemplo en el afinado o el alisado), la velocidad de corte puede ser mayor que cuando las virutas son gruesas (desbastado), debido a que estas últimas generan más calor que las pequeñas.
- Refrigeración: con una buena refrigeración se puede emplear una velocidad de corte mayor.
- Tipo de construcción del torno: un torno robusto soporta velocidades de corte más elevadas que otro de construcción ligera.

1.6.2. Taladro

Otra máquina-herramienta es el taladro, el cual se emplea para hacer agujeros y roscas; las herramientas de corte usadas en él son las brocas. En la figura 14 se muestra un taladro de columna.

Figura 14. **Taladro de columna**



Fuente:<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/df/TaladroColumnaSensitivo.JPG/G/400px-TaladroColumnaSensitivo.JPG>. Consulta: 10 de marzo de 2013.

Una característica de los taladros es la sencillez en su manejo. Los taladros de columna se suelen clasificar según el diámetro de la broca a utilizar, el diámetro de la columna, la potencia del motor eléctrico, el tipo de transmisión del movimiento de rotación de la broca (engranajes o poleas), la superficie de la mesa que soporta la pieza de trabajo y la superficie de la base del taladro. En la figura 14 se muestra un taladro de columna.

Para que los filos de la broca puedan arrancar virutas se requiere del movimiento principal y de avance, de la siguiente manera:

- Rotación de la broca: el movimiento de giro de la herramienta de corte es el movimiento principal.
- Traslación de la broca: este es el movimiento de avance y determina el espesor de la viruta.

El movimiento principal se mide por la velocidad de corte en m/min y el movimiento de avance se mide en mm/rev.

Las partes principales de un taladro de columna son:

- Placa: es donde se asienta el taladro.
- Columna.
- Motor eléctrico.
- Husillo: en él se coloca la broca.
- Mecanismo para el movimiento de avance: el cual permite regular el movimiento vertical del husillo.
- Mesa de taladrar: en ella se coloca la pieza a trabajar.

1.6.2.1. Velocidad de corte, movimiento de avance y refrigeración en el taladrado

Se entiende por velocidad de corte en el taladrado a la velocidad del recorrido del punto más exterior del filo de la broca; se calcula así:

$$v = \pi d N * (1/1000) \text{ rev/min}$$

Donde: d es el diámetro de la broca y N es el número de revoluciones de la misma.

El movimiento de avance se expresa en mm por cada revolución de la broca, por ejemplo 0,2 mm/rev.

Se debe señalar que el taladrado exige una correcta elección del número de revoluciones y de la refrigeración de la broca, además del movimiento de avance.

La broca puede perder su dureza debido al calor que se desarrolla durante el trabajo de taladrado. Por medio de una abundante aportación de un líquido refrigerante adecuado se elimina el calor, se eleva la capacidad de corte de la broca y se mejora la calidad superficial de las paredes del agujero.

1.6.3. Cepillo

El cepillo es la máquina-herramienta con la que se realizan escalones, ranuras, formas, etc. El tipo más común es el de codo horizontal. Se distinguen dos fases en el movimiento principal, realizado por la herramienta de corte durante el cepillado:

- Carrera de trabajo: en la cual se arranca la viruta.
- Carrera en vacío: en la cual la herramienta de corte vuelve hacia atrás sin arranque de viruta.

El movimiento de avance realizado por la pieza a trabajar, determina el espesor de la viruta. Para ello se mueve la pieza contra la herramienta de corte. La profundidad se ajusta en el tornillo de avance; la máxima profundidad es de unas 4 pulgadas. Se muestra en la figura 15 un cepillo de codo horizontal.

Figura 15. **Cepillo de codo**



Fuente:http://images.quebarato.com.mx/T440x/cepillo+de+codo+cuernavaca+morelos+mexico+_2AF9DD_1.jpg. Consulta: 12 de febrero de 2013.

Por medio del movimiento de ajuste se gradúa el espesor de la viruta; este consiste únicamente en colocar la herramienta de corte a determinada altura sobre la pieza a trabajar.

1.6.3.1. Velocidad de corte en el cepillado

En el cepillado son importantes las velocidades de corte y de retroceso, las cuales vienen dadas así:

$$v_c = L / t_c$$

$$v_r = L / t_r$$

L es la longitud de la carrera en m; t_c y t_r son los tiempos empleados en la carrera de trabajo y en la de vacío, respectivamente.

Se relacionan estas dos velocidades, resultando así una velocidad media.

$$v_m = 2 * v_c * v_r (1 / v_c + v_r)$$

Al principio de la carrera de trabajo, la velocidad es nula y aumenta a un valor máximo v_c en la mitad de la carrera; al final de la misma disminuye nuevamente a cero. Lo mismo ocurre con la carrera de vacío, la cual es mayor que la carrera de trabajo.

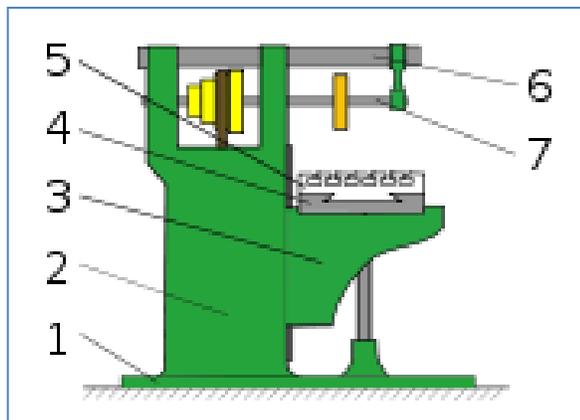
1.6.4. Fresadora

Una máquina-herramienta fundamental en talleres de metal-mecánica es la fresadora, con la cual se realizan superficies planas o curvas, ranuras y especialmente engranes.

En el fresado la herramienta de corte o fresa rota y realiza el movimiento principal o de corte. Los movimientos de avance y de ajuste se realizan en la pieza a trabajar, la cual permanece fija, o en la fresa.

En la figura 16 se muestran los componentes de una fresadora universal.

Figura 16. **Fresadora universal**



Fuente: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/1c/Milling_machine_diagram.svg/220px-Milling_machine_diagram.svg.png. Consulta: 12 de febrero de 2013.

Los componentes principales de una fresadora son:

- Base: sirve de soporte a la fresadora en el suelo.
- Cuerpo: tiene forma de columna y se apoya sobre la base.
- Consola: se desliza verticalmente sobre las guías del cuerpo y sirve de sujeción para la mesa.
- Carro transversal
- Mesa: en ella se coloca la pieza a trabajar.
- Puente: es una pieza apoyada en voladizo sobre el cuerpo y en él se colocan unas lunetas en las cuales se apoya el eje portaherramientas.

- Eje de la herramienta: transmite el movimiento de rotación, proveniente del mecanismo de accionamiento, a la herramienta de corte o fresa.

Una característica de las fresadoras universales es la mesa, la cual es basculante y puede posicionarse angularmente respecto al eje de la fresa; esto permite el mecanizado o fresado de ranuras helicoidales en cuerpos cilíndricos.

Se muestra en la figura 17 una fresadora universal moderna con todos sus accesorios.

Figura 17. **Fresadora universal moderna**



Fuente:http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ed/Fresadora_universal_IES_Polit%C3%A9cnico_Sevilla.JPG. Consulta: 12 de febrero de 2013.

En una fresadora, el cabezal divisor es un accesorio indispensable; su función es espaciar uniformemente el trabajo, por ejemplo, al cortar dientes de engranes. Este dispositivo se coloca sobre la mesa de la máquina; sus partes son:

- Eje principal
- Tornillo sin fin y rueda dentada
- Discos o platos circulares
- Manivela

La pieza a trabajar se coloca en el eje principal del cabezal. La relación de transmisión entre el tornillo sin fin y la rueda dentada es 40:1; es decir, que se requieren 40 vueltas de la manivela para que el eje principal de una vuelta. Este mecanismo permite mecanizar engranes de muchos dientes y también, ejes con ranuras. En general se da la relación siguiente:

$$40 / N$$

N es el número de dientes del engrane. Por ejemplo, si el engrane a mecanizar es de 20 dientes, entonces la manivela debe girar $40 / 20 = 2$ vueltas para pasar de un diente al siguiente. En la figura 18 se muestra un cabezal divisor universal.

Figura 18. **Mecanismo divisor universal**



Fuente: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b7/Mecanismo_divisor.JPG.

Consulta: 12 de febrero de 2013.

Los platos circulares del cabezal divisor son tres y tienen varios juegos de agujeros. Si se desea tallar un engranaje de 33 dientes, por ejemplo, la solución es $40/33 = 1+7/33$, con lo cual hay que instalar un platillo que tenga 33 agujeros y habrá que dar un giro a la manivela de una vuelta completa más 7 agujeros del platillo de 33 agujeros.

1.6.4.1. Velocidad de corte en el fresado

El movimiento de corte en el fresado es circular. La velocidad de corte de la fresa se refiere al recorrido de una de las cuchillas de la misma en m/min y viene dada así:

$$V = d \pi n * (1/1000) \text{ m/min.}$$

Donde: d es el diámetro de la fresa y n es el número de revoluciones de la misma.

La velocidad de corte debe regirse por lo siguiente:

- Material de la herramienta de corte o fresa
- Material de la pieza a trabajar
- El procedimiento de trabajo
- Refrigerante
- Anchura y profundidad del fresado

1.7. Situación en Guatemala

La mayoría de talleres de metal-mecánica en Guatemala son de tamaño mediano-pequeño.

Un porcentaje alto de las máquinas-herramientas empleadas en estos talleres de metal-mecánica son relativamente antiguas (20 o más años de servicio).

Las máquinas-herramientas más comunes en el medio son: el torno, el cepillo y el taladro de columna. No todos los talleres de metal-mecánica disponen de fresadora para ofrecer servicios de fabricación de engranes o mecanizado de superficies planas; pocos talleres disponen de tornos CNC.

Respecto a las herramientas de corte, se puede afirmar que el tipo de desgaste más frecuente en ellas es el de difusión (causada por la excesiva temperatura); otro tipo de desgaste común es el abrasivo.

Hay casos en los que la herramienta de corte falla o se daña por completo durante el mecanizado mismo, siendo la falla por difusión la más frecuente en estos casos; suele ocurrir esto principalmente en buriles de HSS-W (tungsteno), empleados en tornos antiguos. En buriles HSS-Co (cobalto) esto ocurre con menor frecuencia.

Las fallas durante el mecanizado de las herramientas de corte son causadas principalmente por la excesiva dureza de la pieza de trabajo (aceros templados o con un alto contenido de carbono), llegando incluso a la fractura. Hay casos en los que la falla se produce al haber cordones de soldadura en la pieza de trabajo.

En los procesos de torneado puede observarse que los buriles de HSS-W o de HSS-Co se suelen desgastar por abrasión y difusión a la vez. Si el material de la pieza de trabajo es muy duro, la abrasión excesiva causa la pérdida total del filo en la herramienta de corte.

En Guatemala, la mayoría de talleres de metal-mecánica no emplean método alguno (por ejemplo el mencionado en el subcapítulo 1.4), para determinar la vida aproximada de una herramienta de corte. Los cuidados se reducen a la aplicación de lubricante o refrigerante (agua taladrina por ejemplo).

En el fresado ocurre un caso típico al desgastarse la fresa por abrasión. Esta continúa trabajando en el mecanizado aún cuando la abrasión es excesiva, hasta que finalmente se quiebran uno o varios filos. Sucede esto porque en el fresado no siempre se puede detectar abrasión excesiva en la herramienta de corte o fresa.

Tampoco, en la mayoría de talleres, se emplea algún criterio de desgaste para dejar de utilizar una herramienta de corte. Sin embargo, algunos torneros y fresadores evalúan el desgaste de la herramienta por el largo del filo en un buril y/o el diámetro en una fresa.

Incluso, en algunos talleres continúan utilizando las herramientas de corte aun después de estar desgastadas, por ejemplo, mediante incrustaciones de materiales como el widia en buriles HSS-W, o en el caso de las fresas que se emplean para fabricar barras.

La corrección del desgaste abrasivo en una herramienta de corte se efectúa mediante el afilado de la misma en el esmeril.

En los talleres de metal-mecánica de Guatemala, no hay prácticas estándar en el cuidado de las herramientas de corte; así, estas prácticas varían de un taller a otro.

Las herramientas de corte, que son objeto de estudio en este trabajo, son empleadas casi exclusivamente en talleres de metal-mecánica. Las rectoras de motores emplean ruedas o muelas abrasivas y cepillos metálicos para la rectificación de culatas, cigüeñales y el rimado de blocks.

2. AUTOMATIZACIÓN EN PROCESOS DE MECANIZADO

Se define como automatización industrial al uso de sistemas o elementos computarizados y electromecánicos para controlar máquinas y/o procesos industriales, sustituyendo a operadores humanos.

La automatización permite alcanzar mejores niveles de eficiencia en procesos industriales, entre ellos los de mecanizado de metales. En las empresas industriales que implementan eficazmente la automatización se disminuye la producción de piezas defectuosas, y se mejora la calidad del producto final.

La automatización industrial requiere de dispositivos electrónicos variados, tal como: sensores, medidores y transductores, además de controladores lógicos programables (PLC's).

En el caso de metal-mecánica, la automatización de procesos incluye, principalmente los tornos y fresadoras de Control Numérico Computarizado (CNC por sus siglas en inglés). Estas máquinas-herramientas automáticas posibilitan la fabricación de piezas complejas, con exactitud, precisión y velocidad a la vez.

En este capítulo se presentan conceptos relacionados a la automatización en metal-mecánica y sensores y transductores como los empleados en los capítulos 3 y 5 de este trabajo de graduación.

2.1. Control numérico computarizado (CNC)

Por medio del control numérico computarizado (CNC por sus siglas en inglés), una computadora controla la posición de la herramienta de corte y la velocidad de los motores eléctricos que hacen funcionar a una máquina-herramienta determinada.

El término control numérico se refiere a que las órdenes dadas a la máquina-herramienta se indican mediante códigos numéricos. Por ejemplo, para indicarle a la máquina que mueva la herramienta de corte describiendo un cuadrado de 10 milímetros por lado se le darían los siguientes códigos:

- G90,G71
- G00 X0.0 Y0.0
- G01 X10.0
- G01 Y10.0
- G01 X0.0
- G01 Y0.0

G representa las funciones del mecanizado en el control numérico, tales como forma de la trayectoria de la herramienta de corte, ciclo automático de mecanizado, una parada temporizada, etc. La función G va seguida de un número de dos cifras que permite programar hasta 100 funciones preparatorias diferentes.

Así, en el ejemplo anterior G90 es una instrucción que asume el control numérico al iniciar, e indica que todas las medidas que salgan del programa serán tomadas desde un mismo punto de referencia; G71 indica que las medidas se representan en milímetros.

G00 es una instrucción que indica que el trayecto programado de la herramienta de corte se realiza a la máxima velocidad posible; G01 establece que la herramienta de corte se moverá a lo largo de una trayectoria recta; x, y son las coordenadas.

Otra función importante es M, la cual representa las funciones auxiliares o complementarias; indica a la máquina-herramienta que se deben ejecutar operaciones tales como: parada programada, cambio de sentido de rotación del husillo, cambio de herramienta de corte, etc. M va acompañada de un número de dos dígitos, así como G, lo cual permite programar hasta 100 funciones auxiliares diferentes.

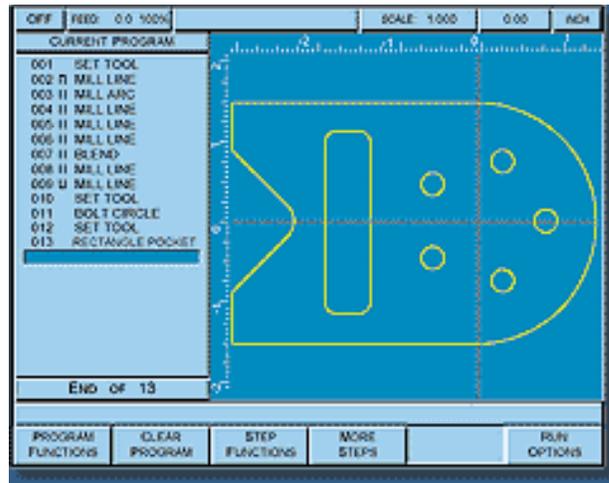
F es la función de la velocidad de avance y está acompañada de un número de cuatro dígitos que indica la velocidad de avance en milímetros por minuto.

Un conjunto de órdenes que siguen una secuencia lógica constituyen un programa de maquinado. Los caracteres anteriormente mencionados para un programa de estos, se rigen por las Normas DIN 66024 y 66025.

Mediante las órdenes o instrucciones adecuadas, la máquina CNC es capaz de maquinar una simple ranura, una cavidad irregular, un molde de inyección para fabricar botellas, etc.

En la figura 19 se muestran cómo se ven las instrucciones de un programa de maquinado.

Figura 19. **Serie de instrucciones de un programa de maquinado**



Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos14/manufaccomput/Image10.gif>. Consulta: 12 de mayo de 2012.

Actualmente, en las máquinas-herramientas de control numérico el programador escoge la operación que desea y la máquina le pregunta los datos que se requieren. Cada instrucción de este lenguaje conversacional puede representar decenas de códigos numéricos.

Así, el maquinado de una cavidad completa se puede hacer con una sola instrucción que especifica el largo, alto, profundidad, posición, radios de las esquinas, etc. Algunos controles incluso cuentan con creación de gráficos en pantalla y funciones de ayuda geométrica.

Otro método de crear programas de maquinado es empleando el Diseño Asistido por Computadora (CAD, por sus siglas en inglés), por medio del cual se diseña la pieza que se requiere mecanizar empleando herramientas de dibujo y modelado.

Luego, mediante la Manufactura Asistida por Computadora (CAM, por sus siglas en inglés), se toma la información del diseño y se genera la ruta que debe seguir la herramienta de corte para mecanizar la pieza por completo.

Los sistemas CNC para máquinas-herramientas se clasifican básicamente así:

- Equipos de control numérico de posicionamiento o punto a punto: estos operan con base en la información proporcionada por el programa, sin importar en absoluto la trayectoria que sigue la herramienta de corte; solo interesan los puntos inicial y final de la trayectoria.

Equipos de control numérico de contorno: estos permiten generar formas curvas.

2.1.1. Arquitectura general de un control numérico

En la arquitectura general de un control numérico se pueden distinguir las partes funcionales siguientes:

- Unidad de entrada y salida de datos: sirve para introducir los programas de mecanizado en el equipo de control numérico, utilizando un lenguaje inteligible para este.
- Unidad de memoria interna: en ella se interpretan las órdenes.
- Enlace con la máquina-herramienta y los servomecanismos: la función principal de un control numérico es gobernar los servomotores de una máquina-herramienta, los cuales provocan un desplazamiento relativo entre la herramienta de corte y la pieza de trabajo situada sobre la mesa.

- Unidad de cálculo: al interpretar la información, se encarga de crear el conjunto de órdenes que gobernarán a la máquina-herramienta

2.2. Torno CNC

Un torno CNC posibilita la manufactura de piezas complejas, con exactitud, precisión y rapidez. Su rentabilidad depende del tipo de pieza que se mecanice y/o de la cantidad de piezas en serie que se fabriquen.

Se muestra en la figura 20 un torno CNC.

Figura 20. Torno CNC



Fuente: imecal.com.br. Consulta: 12 de octubre de 2012.

El funcionamiento de un torno CNC se basa en el programa de mecanizado, en el cual se introducen los siguientes parámetros:

- Velocidad de giro del cabezal que porta las herramientas de corte
- Movimientos de avance de los carros longitudinal y transversal
- Cotas de ejecución de la pieza de trabajo

2.2.1. Partes de un torno CNC

Las partes principales de un torno CNC son:

- Motor y cabezal principal: es el que provoca el movimiento giratorio de las piezas de trabajo; en los equipos modernos, este motor es de C.D. y la potencia mecánica se transmite al husillo por medio de fajas y poleas.
- Bancada y carros porta-herramienta de corte: sobre la bancada están las guías por las cuales se deslizan los carros porta-herramientas.
- Ajuste de carros porta-herramienta.
- Porta-herramientas de corte: en éste pueden ir ubicados de seis a veinte herramientas de corte diferentes, según sea el tamaño del torno.
- CPU: este es el cerebro del torno CNC, el cual incluye el microprocesador. Su accesorio más visible es el monitor que lleva incorporado.

2.3. Servomotores y servomecanismos en tornos CNC

Los servomotores y servomecanismos son dispositivos fundamentales en los tornos CNC modernos.

2.3.1. Definición de servomotor

Un servomotor es un dispositivo electromecánico en el cual una entrada eléctrica determina la posición de la armadura del motor. La característica principal de un servomotor es que puede ser controlado tanto en velocidad de giro como en posición.

Los servomotores se usan en robótica, en carros de control remoto y en aviones; en la figura 21 se muestra uno de estos dispositivos.

Figura 21. **Servomotor**



Fuente: www.baldor.com. Consulta: 12 de octubre de 2012.

Un servomotor consta de las siguientes partes:

- Motor de CD.
- Caja de engranes reductora de la velocidad de giro.
- Sensor de posición: este se puede regular por medio de un potenciómetro.
- Circuito de control: los más modernos tienen control táctil y muestran esquemas de proceso.

El servomotor recibe una señal de control que representa la posición deseada del eje del motor y envía alimentación al motor de CD hasta que el eje del motor llega a esa posición.

El sensor detecta la posición del eje del motor y así se le indica al servomotor en qué sentido debe girar para que el eje del motor llegue a la posición deseada.

Un servomotor debe incluir tres cableados: alimentación, el de tierra y el de control.

2.3.2. Definición de servomecanismo

Un servomecanismo es un sistema electromecánico que se regula a sí mismo al detectar el error, o la diferencia, entre su propio desempeño real y el desempeño deseado.

Los servomecanismos emplean retroalimentación negativa, o de errores, para corregir su desempeño. Un servomecanismo puede o no usar un servomotor.

Un ejemplo simple de servomecanismo es una estufa de uso domiciliario con termostato.

Es de recalcar que en los servomecanismos únicamente se aplica retroalimentación negativa para controlar la posición mecánica y la velocidad a la que opera el mecanismo.

En un servomecanismo la señal de entrada es comparada con la posición actual del sistema mecánico y medido por un transductor a la salida. Tal vez la aplicación más común de un servomecanismo es como sistema de control de posición.

Como ya se mencionó, la función primordial de un CNC es controlar a los servomotores de la máquina-herramienta (torno o fresadora). Para el control de efectivo de estos servomotores se emplean dos tipos de servomecanismos:

- A lazo abierto: las órdenes a los servomotores se envían a partir de la información proveniente de la unidad de cálculo; el servomecanismo no recibe aquí ninguna información de la posición real de la herramienta de corte ni de su velocidad.
- A lazo cerrado: las órdenes a los servomotores dependen tanto de la información proveniente de la unidad de cálculo como de la información proporcionada por el sensor de posición, el cual está montado sobre la máquina-herramienta.

3. MONITOREO DEL DESGASTE DE UNA HERRAMIENTA DE CORTE CON SENSORES DE PROXIMIDAD

Durante los procesos de maquinado de piezas, tales como el torneado o el fresado, el desgaste de las herramientas de corte reduce considerablemente la calidad de la pieza de trabajo.

En la actualidad, a pesar de los avances tecnológicos, la industria manufacturera emplea métodos considerados empíricos para evaluar la vida de una herramienta de corte, es decir, el número de horas de maquinado, el cual asimismo es empírico.

Según ese criterio, al expirar el número de horas de maquinado, la herramienta de corte debe ser removida, aun cuando esté en buenas condiciones.

Este método empírico de evaluación es adecuado cuando la herramienta es usada exactamente bajo las mismas condiciones de corte, y el material de la pieza es lo suficientemente homogéneo para asegurar un desgaste similar en un tiempo de maquinado similar.

En la gran mayoría de casos, el desgaste en una herramienta de corte es inspeccionado a simple vista; así se decide si está en buenas condiciones o no.

La mejor manera de garantizar la calidad de un maquinado final es asegurar que el desgaste de las herramientas de corte esté dentro de un rango definido con antelación.

En este capítulo se presenta una técnica para el monitoreo del desgaste de una herramienta de fresado vertical, por medio de un sensor de proximidad de fibra óptica (SPFO).

3.1. Sensores y transductores

Los términos sensor y transductor suelen aceptarse como sinónimos. Sin embargo, hay necesidad de hacer alguna distinción: un sensor es un elemento que capta las variaciones de una magnitud física y las convierte en variaciones de magnitud eléctrica o magnética.

A las variaciones de magnitud eléctrica o magnética se les llama señales. Un transductor, en cambio, es un concepto más amplio, ya que incluye al sensor propiamente dicho y algún tipo de circuito eléctrico que acondiciona la señal detectada.

Un transductor es un dispositivo capaz de convertir el valor de una magnitud física en una señal eléctrica codificada, ya sea en forma analógica o digital; consta de las siguientes partes:

- Sensor.
- Bloque de tratamiento de señal: es un conjunto de circuitos eléctricos que filtran, amplifican y hacen lineal la señal obtenida por el sensor.
- Etapa de salida: comprende los amplificadores, interruptores, convertidores de código, transmisores, etc. Su función es adaptar la señal a las necesidades de la carga exterior.

Según el tipo de señal de salida, los transductores se pueden clasificar así:

- Analógicos.
- Digitales.
- Todo o nada: únicamente indican cuando la variable detectada rebasa un cierto umbral o límite.

Una forma de clasificar a los transductores es por la magnitud física detectada; algunos de los más comunes son:

- Detectores de presencia o proximidad
- De temperatura
- De presión
- De velocidad

Los transductores, también pueden subdividirse por su funcionamiento, por ejemplo, los detectores de proximidad pueden ser:

- Inductivos
- Capacitivos
- Ópticos

Se muestran en la figura 22 sensores de proximidad inductivos, utilizados comúnmente en la industria. Algunas de sus características, las cuales comparten con los sensores de proximidad capacitivos, son:

- Detectan la proximidad de piezas metálicas, principalmente.
- Rango de detección: distancias desde 1 milímetro hasta 30 milímetros.
- Resolución: en el orden de décimas de milímetros.
- Pueden ser de forma cilíndrica roscada o paralelepípedo.

Figura 22. **Sensores de proximidad inductivos**



Fuente. www.directindustry.es. Consulta: 10 de marzo de 2013.

En la figura 23 se muestran sensores de proximidad capacitivos.

Figura 23. **Sensores de proximidad capacitivos**



Fuente: http://www.sick.com/es/es-es/home/products/product_portfolio/industrial_sensors/PublishingImages/kapazitive_naehेरungs_sensoren_cm.jpg. Consulta: 10 de marzo de 2013.

En la figura 24 se muestra un sensor de proximidad óptico.

Figura 24. **Sensor de proximidad óptico**



Fuente:http://img.alibaba.com/photo/551727531/K38_Series_optical_proximity_sensor.jpg.

Consulta: 10 de marzo de 2013.

3.1.1. Características de los transductores

Un transductor ideal sería aquel en que la relación entre la magnitud física a detectar (variable de entrada) y la variable eléctrica de salida fuera puramente proporcional y de respuesta instantánea.

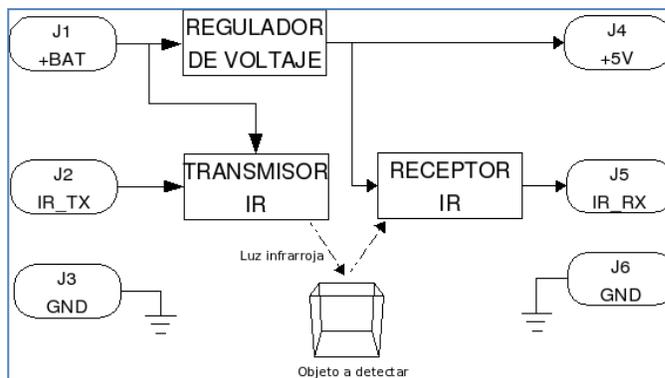
Sin embargo, en la práctica la relación entre la entrada y la salida del transductor no es del todo proporcional, además la respuesta real del transductor tiene un tiempo limitado de validez y suele verse afectada por las perturbaciones del exterior.

Así, algunas de las características deseables en un transductor confiable son:

- Resolución: es la capacidad del transductor para discernir entre dos valores muy próximos de la variable de entrada.
- Precisión: es la característica que indica la máxima desviación entre los valores de la variable de salida obtenidos al medir varias veces un mismo valor de variable de entrada.
- Exactitud: se refiere a la máxima desviación entre valores de variable de salida reales respecto a un valor teórico que correspondería en idénticas condiciones ambientales, según el modelo ideal (patrón).
- Sensibilidad: es la característica que indica la mayor o menor variación de la salida del transductor por unidad de la variable de entrada.
- Respuesta en frecuencia: se refiere a la relación entre la sensibilidad y la frecuencia cuando en la entrada se tiene una excitación sinusoidal.

En la figura 25 se muestra el diagrama de bloques de un transductor de proximidad.

Figura 25. **Diagrama de bloques de un transductor de proximidad. Tx es transmisión y Rx recepción**



Fuente: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/74/IrSensora_block_diagram.png.

Consulta: 12 de octubre de 2012.

3.2. Métodos de detección del desgaste en herramientas de corte

Son pocos los métodos empleados, aparte de la inspección visual, para la verificación del desgaste en una herramienta de corte.

La estrategia común en estos métodos, aparte del visual, es la detección del desgaste de la herramienta de corte mediante el monitoreo de magnitudes físicas tales como:

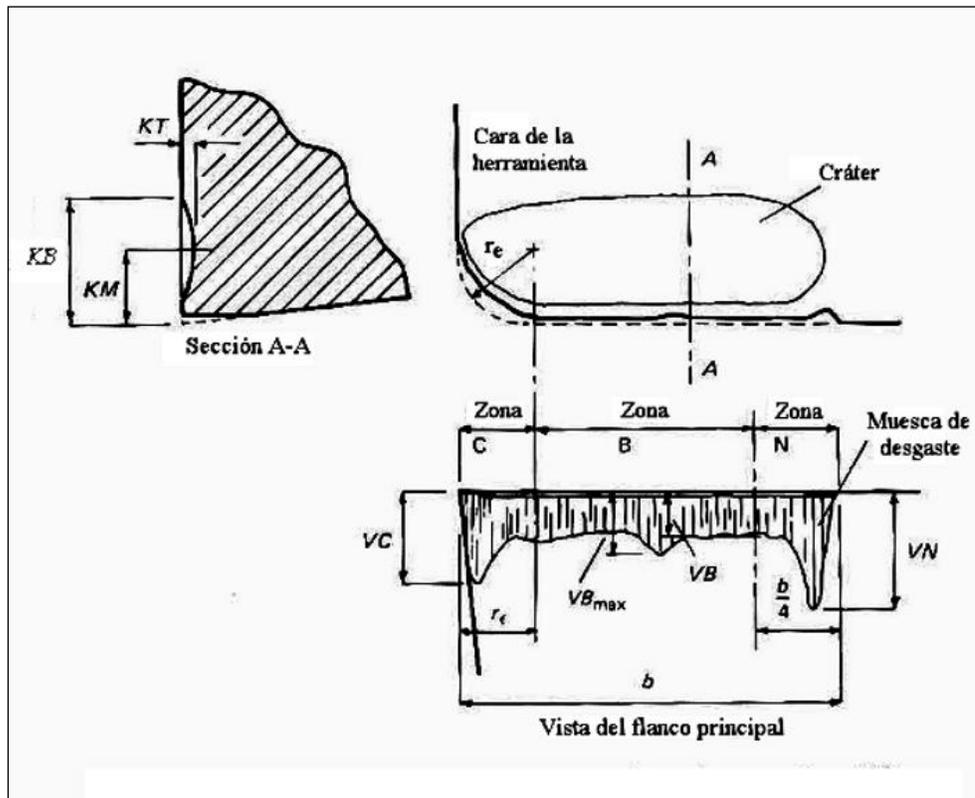
- Corriente en motores eléctricos
- Acústica
- Fuerza de corte
- Por medio de estos métodos se trata de establecer si hay correlación entre esas magnitudes físicas y el desgaste o ruptura de la herramienta de corte.

3.2.1. Criterio de duración de las herramientas de corte

El método de inspección visual se aplica conjuntamente con el criterio de duración de la herramienta de corte, por medio del cual se obtiene un valor mínimo del tiempo de vida de la herramienta antes de que se desgaste.

Se debe señalar que en las operaciones de mecanizado de piezas, el desgaste de flanco y el de cráter no son uniformes a lo largo del filo principal, por lo que se especifica la localización y el grado permisible de desgaste en cada caso. En la figura 26 se muestra una herramienta de corte ya desgastada.

Figura 26. Herramienta de corte ya desgastada



Fuente: www.geocities.com. Consulta: 13 de septiembre de 2011.

La profundidad del cráter es medida desde el punto más profundo de este y el desgaste de flanco es mayor en los extremos del filo principal.

En la figura 26 se puede observar que el desgaste de flanco no es uniforme en las zonas C, B y N, por lo que se considera un ancho promedio en la zona central, o ancho de estría VB , como se mencionó en el capítulo 1.

Los criterios recomendados por la ISO para definir la duración efectiva de una herramienta de corte son:

- Por rotura
- VB promedio de 0,3 mm
- VB promedio de 0,6 mm

3.2.2. Monitoreo de la corriente del motor eléctrico

El monitoreo de la corriente del motor eléctrico que acciona el husillo principal de la máquina-herramienta, es el segundo método más empleado, después del visual.

Cuando un filo de la herramienta de corte (por ejemplo una fresa) está desgastado, el siguiente filo debe remover el material excedente, entonces la fuerza cortante se incrementa y, a su vez, se incrementa la corriente del motor eléctrico del husillo.

Al incrementarse la corriente del motor eléctrico, el proceso de maquinado debe detenerse. Se envía una señal al operador de la máquina-herramienta para que se verifique o se sustituya la herramienta de corte.

Este método es usado, principalmente, para detectar la ruptura de la herramienta y/o el atascamiento de la misma con la pieza a mecanizar, ya que en este caso la variación en la corriente del motor eléctrico es muy evidente.

3.2.3. Monitoreo de la emisión acústica del proceso de corte

Otro método aplicado en la industria metal-mecánica, es el de monitoreo de la emisión acústica del proceso de corte.

En este método se emplea una estrategia similar al anterior; cuando la señal alcanza un límite preestablecido, el proceso de maquinado es interrumpido.

La principal ventaja de la emisión acústica es que el rango de las frecuencias de sus señales es mucho mayor que los de las vibraciones de las máquinas o de los ruidos ambientales; además, no es intrusiva en los procesos de corte.

La emisión acústica está directamente relacionada con el estado de la herramienta de corte y se genera por lo siguiente:

- Deformación plástica
- Rozamiento
- Fractura de virutas
- Propagación de fisuras

Tanto la deformación plástica como la fractura son las fuentes más importantes de emisiones acústicas en el mecanizado de metales.

En este método, las señales acústicas provenientes del proceso de mecanizado son convertidas en señales eléctricas por medio de sensores; estas son amplificadas en preamplificadores (40 dB) y medidas por medio de una tarjeta electrónica (la cual tiene un canal para el procesamiento de señales y otro para la forma de onda), conectada a una computadora.

La desventaja de este método es que su aplicación es limitada en la industria, debido a que el establecimiento de un valor umbral para el control depende fuertemente de las variables del proceso.

3.2.4. Monitoreo de la fuerza de corte

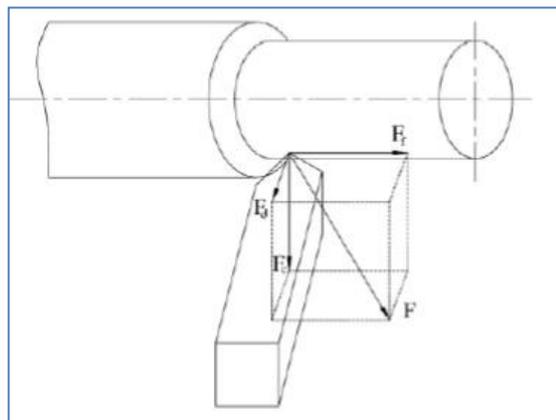
En los procesos de mecanizado de piezas, la fuerza de corte se ve influida por el avance, la profundidad y la velocidad de corte.

Por ejemplo, en el torneado se originan tres componentes de fuerza en la herramienta de corte, las cuales son:

- Longitudinal: actúa a lo largo de la dirección de avance de la herramienta.
- Radial: actúa en la dirección de avance radial de la herramienta de corte.
- Tangencial a la superficie de la pieza: esta es la de mayor magnitud y se le conoce como fuerza principal de corte.

Estas tres componentes de fuerza se muestran en la figura 27.

Figura 27. **Componentes de fuerza en la herramienta de corte en el torneado**



Fuente: <http://www.ing.uc.edu.ve/jpereira/descargas/publicaciones/fuerza%20de%20corte%20A%20A356.pdf>. Consulta: 13 de septiembre de 2011.

Experimentalmente, la fuerza principal de corte (o tangencial) se suele medir con un dinamómetro, al cual se le agrega un sistema de acondicionamiento de la señal y otro de adquisición de datos, los cuales son procesados en una computadora personal con software de visualización y monitoreo en tiempo real.

Este método puede emplearse para determinar parámetros de fuerza de corte en el mecanizado de materiales nuevos o mejorados.

En los procesos de fresado y torneado, la magnitud de la fuerza de corte dependerá de la dureza del material de la pieza de trabajo. Así en los aceros templados, por ejemplo, la magnitud de la fuerza de corte será mayor.

3.3. Monitoreo con sensor de proximidad de fibra óptica (SPFO)

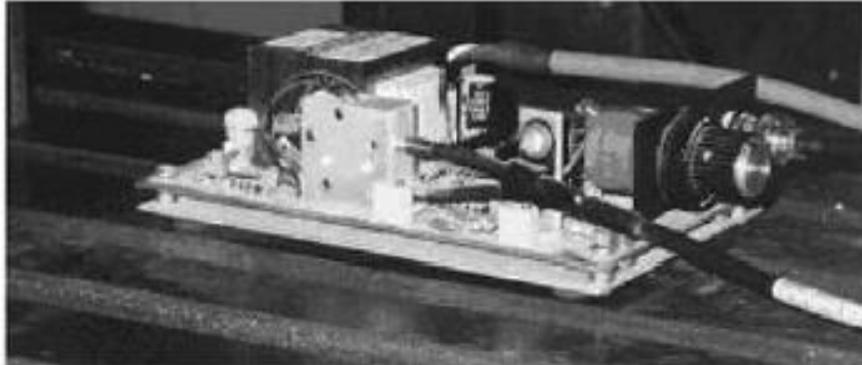
A diferencia de los métodos mencionados anteriormente, el monitoreo del desgaste de una herramienta de corte con SPFO es considerado directo, ya que se realiza mientras la herramienta está trabajando.

3.3.1. Descripción del SPFO

El SPFO, llamado también sensor fotónico, permite monitorear el desgaste de una herramienta de corte en tiempo real, con una precisión de una micra. Proporciona una medida de la distancia entre su extremo y el perfil de la herramienta de corte.

En la figura 28 se muestra el sensor fotónico empleado en el estudio.

Figura 28. **Sensor fotónico**



Fuente: www.scielo.cl. Consulta: 14 de septiembre de 2011.

El SPFO mostrado en la figura 28 es un dispositivo de fibra óptica modelo KD-300 (instrumentos MTI), con una punta de prueba tipo MT-2125-R. Las características principales de este sensor son:

- Diámetro de la punta de la sonda: 2,28 mm
- Respuesta en frecuencia: 150 kHz
- Límite de detección: 0,25 μm
- Sensibilidad de desplazamiento: 0,76 m/mV
- Rango lineal: 3,05 mm
- Distancia del alejamiento: 6,09 mm
- Pico óptico: 1,22 mm

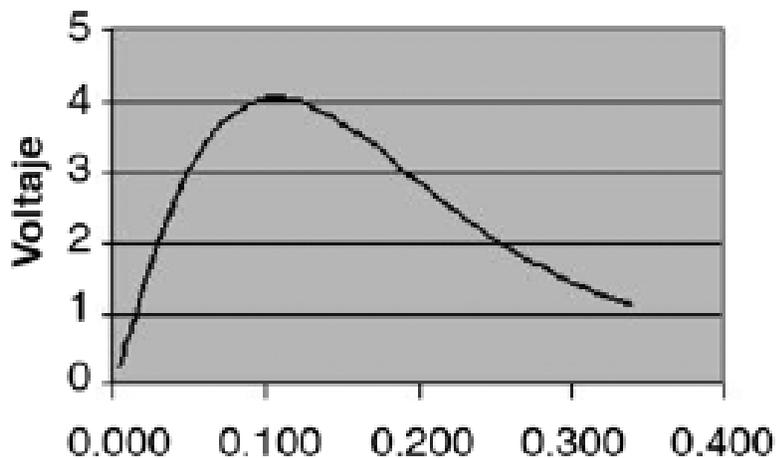
La respuesta en frecuencia, en este caso se refiere a la frecuencia en la que la salida del sensor empieza a disminuir de valor. La sensibilidad indica la mayor o menor variación de la salida (mV) por unidad de distancia (mm).

El ancho de banda, el cual es el rango de frecuencias en el que la salida del sensor (en mV) es constante, en este caso no tiene ninguna limitante y está determinado por los componentes electrónicos del transductor.

La punta de prueba tiene dos grupos de fibras ópticas conjuntadas. El sensor convierte la cantidad de luz reflejada en una señal eléctrica que es proporcional a la distancia de la punta de prueba a la superficie objetivo.

En la figura 29 se muestra la curva de respuesta que relaciona el voltaje de salida y la separación a la superficie objetivo. La parte inicial de subida de la curva, llamada pendiente frontal, es muy sensible y constituye el rango de operación normal del sensor para mediciones de alta precisión. La parte descendiente de la curva, llamada pendiente trasera, es utilizada para mediciones que requieren una distancia de separación más elevada.

Figura 29. **Curva de respuesta que relaciona el voltaje de salida y la separación a la superficie objetivo**



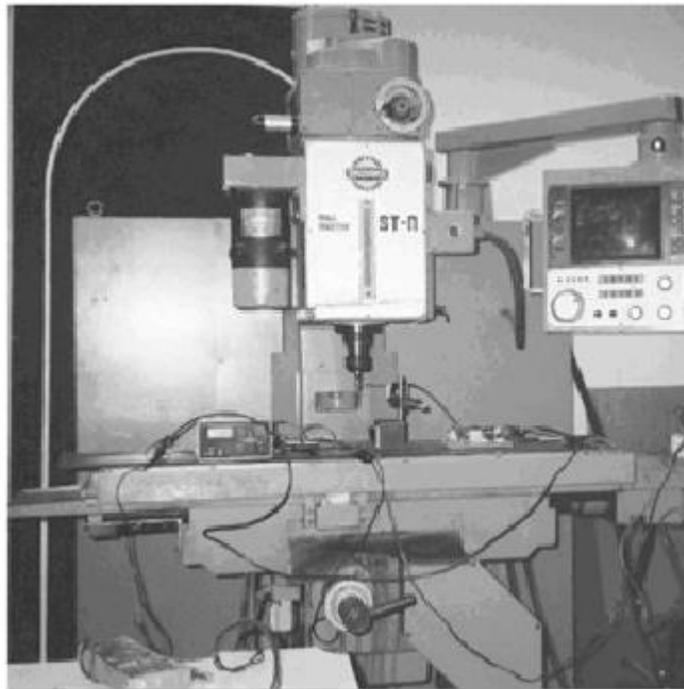
Distancia de la superficie al sensor (in)

Fuente: www.scielo.cl. Consulta: 14 de septiembre de 2011.

3.3.2. Arreglo experimental para el monitoreo

Se muestra en la figura 30 el arreglo experimental para el monitoreo.

Figura 30. Arreglo experimental para el monitoreo



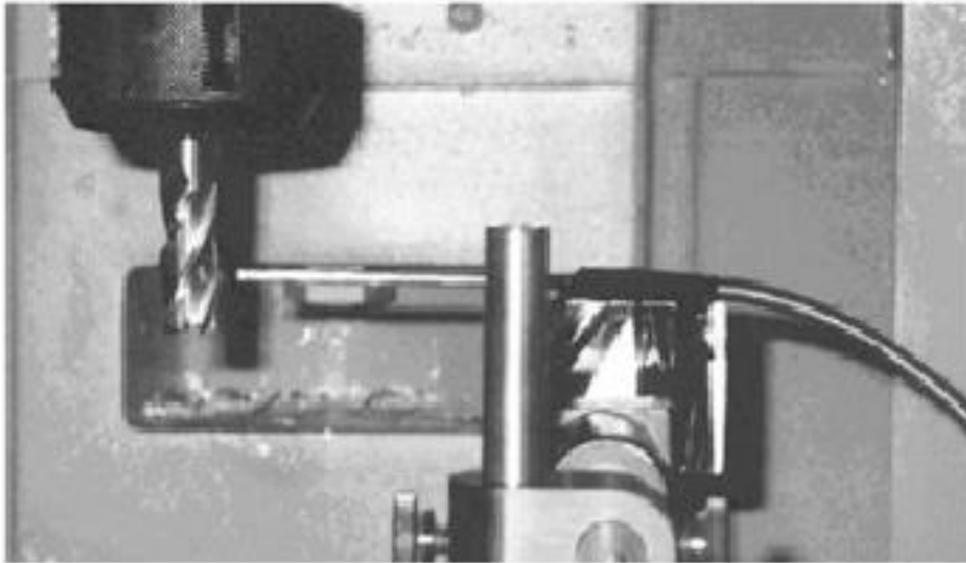
Fuente: www.scielo.cl. Consulta: 14 de septiembre de 2011.

El arreglo experimental está compuesto por lo siguiente:

- Una máquina VMC SHIZUOKA 3 EJES
- Tarjeta de adquisición de datos con el período de muestreo de 150 kHz
- SPFO
- Computadora personal

El SPFO se montó en una base magnética y se ubicó frente a la fresa circular, mientras esta giraba, a una distancia de 2 milímetros para observar el perfil de la fresa circular durante el movimiento; esto se muestra en la figura 31.

Figura 31. **SPFO y fresa circular**

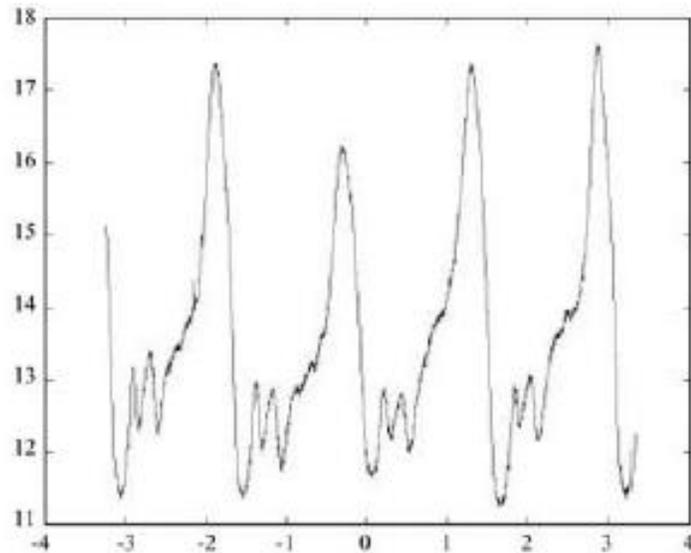


Fuente. www.scielo.cl. Consulta: 14 de septiembre de 2011.

3.3.3. Gráficas de resultados

Se muestra en la figura 32 la respuesta, en voltios, del SPFO cuando uno de los 4 flancos de la herramienta de corte está desgastado. Se puede identificar claramente cada uno de los flancos de la fresa circular en cada una de las vueltas mientras gira.

Figura 32. **Voltaje de salida del SPFO vs el tiempo**



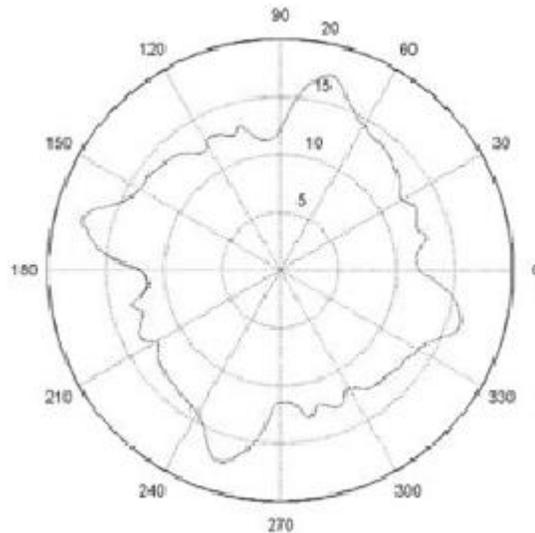
Fuente: www.scielo.cl. Consulta: 15 de septiembre de 2011.

El SPFO empleado proporciona mediciones de desgaste de muy buena calidad; se pudo utilizar un sensor láser, pero su costo es muy elevado y también pueden causar daños en los ojos si no se toman medidas de seguridad.

Se debe señalar que el método de monitoreo con SPFO tiene la capacidad de reconstruir el perfil de la herramienta de corte después de una sola vuelta de la misma, brindando así una medición rápida y lo suficientemente precisa del desgaste.

En la figura 33 se muestra la gráfica polar del SPFO; se puede observar que el desgaste se localiza después de 330 grados.

Figura 33. **Gráfica polar del desgaste**



Fuente: www.scielo.cl. Consulta: 15 de septiembre de 2011.

Para proteger la punta de la sonda del SPFO de las virutas durante el proceso de mecanizado, se recomienda inyectar aire comprimido a un lado del sensor.

3.4. Situación en Guatemala

Se puede afirmar que en la mayoría de los talleres de metal-mecánica de Guatemala, no se emplea método alguno, aparte del visual, para la detección de desgaste en herramientas de corte.

Asimismo, los métodos mencionados en el punto 3.2. son desconocidos en el medio. Sin embargo, en algunos talleres se efectúan monitoreos de variables como la fuerza de corte y la acústica, aunque de manera rudimentaria.

El monitoreo de la acústica se reduce simplemente a detectar un posible desgaste en la herramienta de corte al escucharse ruidos muy agudos; la experiencia del operador de la máquina-herramienta le permite percatarse del desgaste en la herramienta de corte.

En Guatemala, el nivel de automatización en la mayoría de los talleres de metal-mecánica es bajo. Sin embargo, se puede afirmar que la implementación de métodos que detecten el desgaste en herramientas de corte durante los procesos de mecanizado (no antes ni después de los mismos), es importante debido a lo siguiente:

- Costo: se posibilita el cambio o reemplazo de la herramienta de corte antes de que el desgaste en la misma sea demasiado severo y se estropee.
- Mejor acabado en las piezas de trabajo: los reemplazos a tiempo de la herramienta de corte durante el mecanizado posibilitan mejores acabados y ofrecen garantías en la pieza de trabajo.

Entre las posibles limitantes que pueden haber para aplicar el monitoreo de las herramientas de corte mediante SPFO están:

- No uniformidad del filo de la fresa vertical: en algunos casos el SPFO podría emitir una señal de detección de desgaste donde no lo hubiese.
- Verificar la forma del SPFO: esto con el fin de evitar estorbos en el mecanizado de las piezas.
- Las fresadoras en Guatemala, emplean distintos tipos de fresas: El método del SPFO que es objeto de análisis en este capítulo, solo es aplicable a fresas verticales, lo que implica el retiro o remoción del SPFO al realizarse trabajos de mecanizado con los otros tipos de fresas.

4. EVALUACIÓN DEL DESGASTE EN HERRAMIENTAS DE CORTE EN PROCESOS DE TORNEADO, MEDIANTE MONITOREO INTELIGENTE

Los procesos de manufactura, tales como el torneado o el taladrado, son ejemplos claros de sistemas de una elevada complejidad. Las dinámicas involucradas en estos procesos son muy importantes a la hora de diseñar sistemas que optimicen y/o mejoren los procesos en tiempo real.

El monitoreo de procesos es una de las vías que permiten obtener ventajas competitivas en los procesos de manufactura.

Los procesos de mecanizado involucran materiales y máquinas-herramientas costosas y operadores calificados; cualquier modelo que sea capaz de describir los procesos físicos que ocurren en el mecanizado es esencial para maximizar la productividad y minimizar la tasa de fallos.

4.1. Definición de control inteligente

Mediante el control inteligente se pretende resolver problemas de control empleando técnicas de la inteligencia artificial, entre las que se incluyen las siguientes:

- **Sistemas expertos:** la base de conocimientos de control se obtiene de un experto humano, o sea el operador del proceso a controlar.
- **Lógica borrosa:** es un control que se basa en técnicas que manejan la imprecisión y las incertidumbres en los procesos.

- Redes neuronales: son estructuras de procesamiento de información, formadas por elementos interconectados mediante canales unidireccionales de información.
- Algoritmos genéticos: se emplean para depurar de forma automática las reglas que forman la base del conocimiento del proceso en cuestión.

En sí, las posibilidades de implementación de un sistema de control inteligente dependen de la disponibilidad de información del proceso a controlar. Así, el funcionamiento correcto de un sistema de control inteligente dependerá del conocimiento del estado real del proceso, ya sea en su operación normal o en su funcionamiento degradado debido a la aparición de fallos o cambios no previstos.

4.1.1. Inteligencia artificial

Se le conoce como la disciplina por medio de la cual se construyen sistemas artificiales, que al ser ejecutados por una arquitectura física (o sea, una computadora que ejecuta determinadas tareas), producen acciones o resultados que optimizan una medida de rendimiento determinada.

Los sistemas artificiales construidos en la inteligencia artificial, basan su funcionamiento en la secuencia de señales de entrada recibidas y en el conocimiento almacenado en la arquitectura física.

Según lo anterior, se puede afirmar que un control inteligente se caracteriza por lo siguiente:

- Las percepciones de un proceso se obtienen mediante sensores de distintos tipos.

- Las acciones en un proceso se ejecutan por medio de actuadores mecánicos o electromecánicos en máquinas eléctricas, por pulsos eléctricos en computadoras o por un sistema de entradas y salidas en un entorno de software.

4.1.2. Lógica difusa y funciones de pertenencia

En inteligencia artificial, lo que se conoce como lógica difusa, se emplea en la resolución de una variedad de problemas, principalmente los relacionados con el control de procesos industriales y sistemas de toma de decisiones; la lógica difusa se aplica en dispositivos, como cámaras digitales y sistemas de aire acondicionado.

En la lógica difusa, los sistemas imitan la forma de razonamiento de los seres humanos, con la ventaja de ser mucho más rápidos; estos sistemas son generalmente robustos y tolerantes a los ruidos e imprecisiones en las variables de entrada.

Con la lógica convencional, los sistemas manejan valores estrictamente duales, como verdadero/falso o sí/no; en cambio, con la lógica difusa se emplean modelos matemáticos para representar nociones subjetivas, como caliente/tibio/frío; para crear valores concretos que puedan ser manipulados por los sistemas.

En los sistemas que emplean la lógica difusa, la variable del tiempo es de vital importancia, ya que estos sistemas pueden requerir retroalimentación en un tiempo determinado o pueden necesitarse datos anteriores para hacer una evaluación media de la situación actual del sistema.

La función de pertenencia indica el grado en que cada elemento de un universo dado pertenece a dicho conjunto; es decir, la función de pertenencia de un conjunto A sobre un universo X será de la forma:

$$f_A : X \rightarrow (0,1)$$

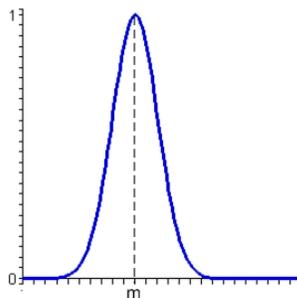
$f_A(x) = r$, si r es el grado en que x pertenece a A. Si el conjunto es nítido, la función de pertenencia tomará los valores (0,1), mientras que si es un conjunto borroso, los tomará en el intervalo $0 \leq x \leq 1$. De esta forma:

$f_A(x) = 0$ si el elemento no pertenece al conjunto

$f_A(x) = 1$ si el elemento pertenece totalmente al conjunto

Las funciones de pertenencia representan gráficamente un conjunto borroso sobre un universo. En la figura 34 se muestra, a manera de ejemplo, una función de pertenencia de forma gaussiana $f_A(x) = e^{-k(x-m)^2}$

Figura 34. **Función de pertenencia de forma gaussiana**



Fuente: <http://www.dma.fi.upm.es/java/fuzzy/tutfuzzy/imagenes/fgaussiana.gif>. Consulta: 12 de enero de 2012.

4.1.3. Técnicas de monitoreo basado en modelos

Actualmente, los sistemas de monitoreo permiten un diálogo con el operador humano mediante gráficas, números y símbolos que ofrecen información relativa al proceso o a la máquina a monitorear en tiempo real.

En el caso del torneado se deben incluir aspectos no solo cuantitativos sino cualitativos.

Un sistema de monitoreo depende de la capacidad para obtener en estado real el funcionamiento del proceso, ya sea en operación normal o en operación degradada debido a fallos o cambios imprevistos; por medio de sensores se puede obtener la información necesaria.

Muchos de los sistemas de monitoreo actuales se basan en una gran variedad de sensores, los cuales posibilitan un aumento en la precisión y eliminan las ambigüedades sobre el conocimiento del entorno del proceso.

Las señales obtenidas por medio de los sensores se deben traducir, para que se tenga una información útil de la representación del estado del proceso. El procesamiento de la señal se puede efectuar de dos formas:

- Método directo: se miden los valores reales de las variables principales del proceso.
- Método indirecto: se miden los valores reales de las variables que se correlacionan con las variables principales del proceso.

Ya sea por métodos directos o indirectos, el sistema de monitoreo debe sacar conclusiones a través de un modelo matemático o empírico del proceso a estudiar.

La comparación entre la respuesta del proceso real con la estimación realizada por el modelo del proceso y los residuos de esta comparación, constituyen la base de estos métodos.

Los sistemas de monitoreo basados en modelos ofrecen las ventajas siguientes:

- Las salidas son comparadas con los valores esperados con base en las condiciones reales del proceso.
- La probabilidad de detectar errores en etapas tempranas del proceso se incrementa.
- El sistema de monitoreo se vuelve inmune a las perturbaciones que no se detectan en el proceso.

La principal desventaja de un sistema de monitoreo basado en modelos es el empleo de un modelo matemático en sí; aparte se puede incrementar la complejidad en la toma de decisiones.

4.2. Monitoreo del desgaste en herramientas de corte en procesos de mecanizado

En el punto 3.2. de este trabajo se mencionaron algunos métodos para el monitoreo del desgaste en herramientas de corte.

El monitoreo del desgaste en herramientas de corte en el torneado debe estar relacionado con la calidad superficial del trabajo a efectuar y la productividad, teniendo en cuenta lo siguiente:

- Costo de la herramienta de corte.
- Costo de la reposición de la herramienta de corte.
- Inactividad de la máquina-herramienta (esto también viéndolo como un costo).

El objetivo de un sistema de monitoreo debe ser el de mantener o mejorar la calidad del producto final del proceso, reduciendo asimismo los costos de operación.

Por ejemplo, emplear un buril desgastado o con falta de filo puede causar mayores esfuerzos en el motor eléctrico del torno y, asimismo, la pérdida en la calidad de la pieza de trabajo, debido a las vibraciones que se generan en la máquina-herramienta.

En distintos países se han efectuado investigaciones para el monitoreo de herramientas de corte en el mecanizado de metales, empleando como base el torneado, básicamente debido a lo siguiente:

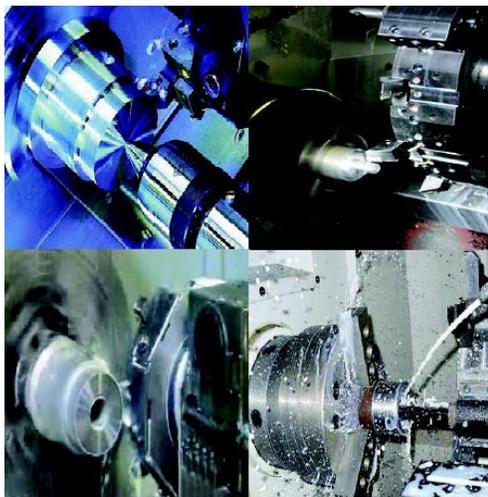
- El proceso de arranque de viruta en el torneado es relativamente sencillo de describir, ya que se producen únicamente cortes oblicuos u ortogonales; estos tipos de corte se pueden describir en un único plano.
- La herramienta de corte o buril no gira, lo que hace que el procesamiento de las señales provenientes de los sensores sea más sencillo.

Algunos métodos aplicados para detectar desgaste y/o rotura en la herramienta de corte en el torneado son la emisión acústica y el análisis de las fuerzas de corte del proceso (métodos descritos en los puntos 3.2.3. y 3.2.4. de este trabajo).

Otro método de análisis de desgaste en herramientas de corte es el de análisis de vibraciones. En él, inicialmente se recopilan datos para formar una matriz, la cual contiene dos columnas: una de parámetros de herramienta de corte sin desgaste y otra de parámetros de herramienta de corte con desgaste.

Luego, las mediciones realizadas se comparan con los datos almacenados en la matriz y se toma una decisión basada en la distancia matemática entre el vector de medición y los vectores de sin desgaste y con desgaste, los cuales también se almacenan en la matriz. En la figura 35 se muestran algunas imágenes de procesos de torneado.

Figura 35. **Imágenes de procesos de torneado**



Fuente: GAJATE MARTIN, Agustín. *Control de Mecanizado de Alto Rendimiento*. p. 37.

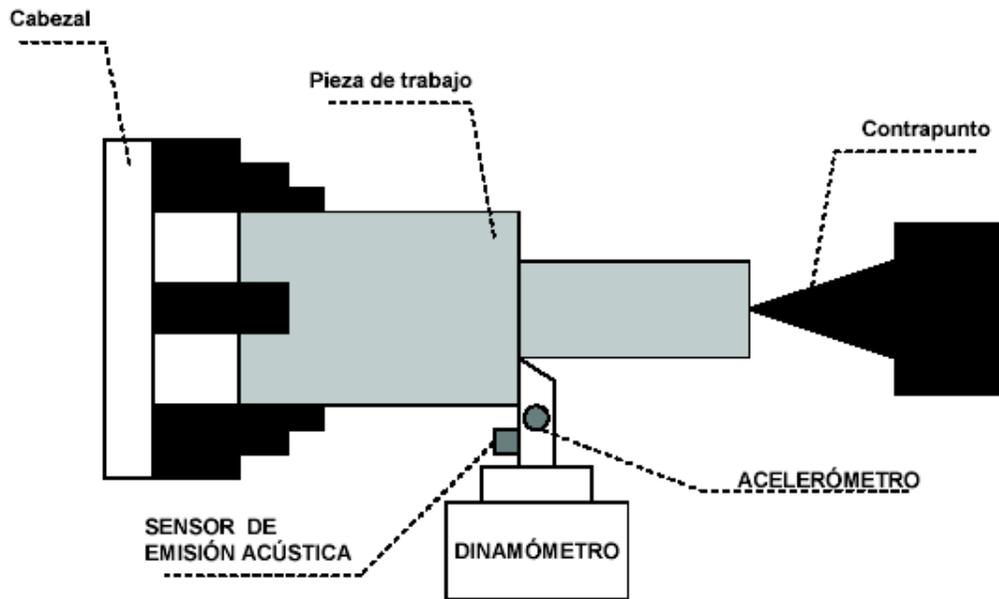
Todos los métodos descritos tienen sus limitaciones propias; se puede afirmar que las redes neuronales artificiales son las que mejores resultados han dado, a escala de laboratorio, por supuesto.

El modelado del proceso (en el presente caso, el torneado) y las técnicas estadísticas juegan un papel muy importante en el diseño e implementación de un sistema de monitoreo inteligente. La idea es obtener un modelo de la operación conjunta de las funciones y elementos del proceso de torneado, en lugar de obtener un modelo aislado.

4.3. Plataforma experimental para el monitoreo del torneado

En la figura 36 se muestra el esquema de la plataforma experimental empleada para monitorear el proceso de torneado, con sus respectivos elementos y las posiciones de estos.

Figura 36. **Plataforma experimental para el monitoreo del proceso de torneado**



Fuente: GAJATE MARTIN, Agustín. *Control de Mecanizado de Alto Rendimiento*. p. 136.

En la figura 36 se representan tanto el cabezal como el contrapunto del torno; un acelerómetro es un transductor empleado para detectar las vibraciones de componentes o elementos que son sometidos a movimientos de velocidades elevadas. Detectando las vibraciones se evitan los esfuerzos dinámicos excesivos en un cuerpo; en la figura 37 se muestra un acelerómetro piezoeléctrico.

Figura 37. **Acelerómetro piezoelectrico de cuarzo**



Fuente:http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b1/Acelerometro_1.JPG/250px-Acelerometro_1.JPG. Consulta: 25 de enero de 2012.

En sí, el propósito de la plataforma experimental es que para cada operación que se realice en el torno se almacenen los siguientes datos y/o señales:

- Emisión acústica (número de pulsos).
- Vibraciones sufridas por la herramienta de corte: estas las detecta el acelerómetro.
- Fuerzas de corte: estas son detectadas por el dinamómetro.
- Tiempo del proceso.
- Datos del desgaste de la herramienta de corte.

Para la medición del desgaste en la herramienta de corte se utiliza un microscopio; para el almacenamiento y procesamiento de las señales se emplea una computadora.

Para fines de este trabajo de graduación la máquina-herramienta empleada es un torno marca Kirloskar; en él se ha colocado un portaherramientas especial con una plataforma en la que está situado el dinamómetro. La señal de esta plataforma se envía a la computadora, que la recibe por medio de una tarjeta de adquisición.

Para la medición de las vibraciones se emplea un acelerómetro marca IRD 90 (fabricado en la India), en la superficie superior de la herramienta de corte. El acelerómetro se conecta a su vez, a un analizador de vibraciones, como el mostrado en la figura 38.

Figura 38. **Analizador de vibraciones PCE-VT204 y accesorios para la adaptación del sensor (acelerómetro)**



Fuente: www.pce-iberica.com. Consulta: 6 de febrero de 2012.

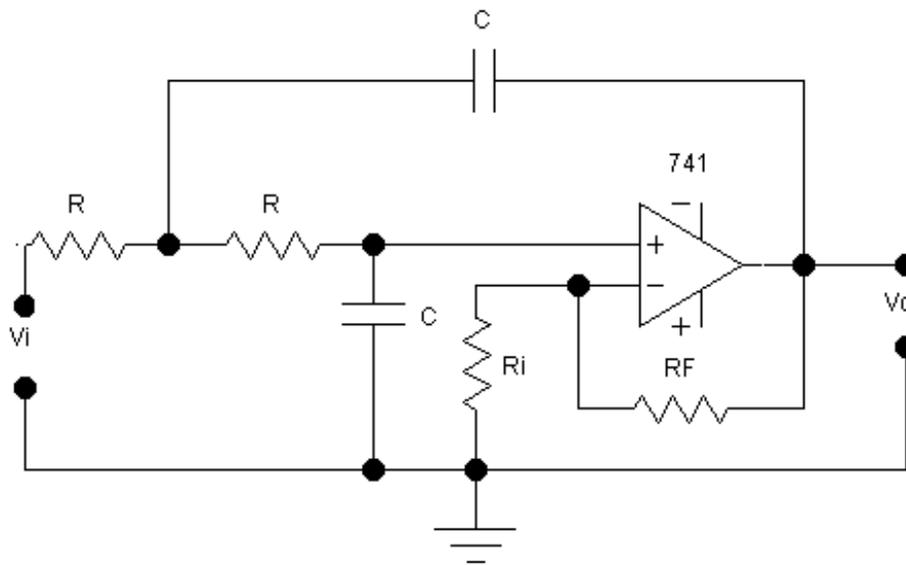
Este analizador de vibraciones es un PCE-VT204; este aparato permite medir fácilmente los tres parámetros esenciales de las vibraciones: desplazamiento, velocidad y aceleración.

Un analizador de vibraciones, como el mostrado en la figura 38, permite la carga de datos de vibraciones en una computadora para su procesamiento, ya que suelen venir equipados con software y memoria no volátil.

Para detectar la emisión acústica se empleó un transductor piezoeléctrico con un gel de acoplamiento especial para ultrasonidos; las señales eléctricas producidas por este transductor son primeramente amplificadas por un amplificador de 60 decibeles de ganancia. Luego, estas señales son filtradas mediante un filtro pasa-bajo y el voltaje umbral se sitúa en 1 voltio.

Un filtro pasa-bajo es un circuito eléctrico que permite el paso de las señales de frecuencia más bajas e impide el paso de las frecuencias más altas; el filtro requiere dos terminales de entrada y dos de salida. Todas las frecuencias de señal posibles pueden estar en la entrada del filtro, pero a la salida del mismo solo estarán presentes las que deje pasar el filtro. Se muestra en la figura 39 el diagrama del circuito eléctrico del filtro pasa-bajo.

Figura 39. Diagrama del circuito eléctrico del filtro pasa-bajo



Fuente: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcThadX8CKrMWu6fNRywOw3Intr6-YATjFgdh8TGDRVSEq7H5xzGAQ>. Consulta: 7 de febrero de 2012.

Las señales acústicas, luego de su acondicionamiento, son procesadas en una computadora.

Mediante esta plataforma experimental y con los sensores es posible recabar datos experimentales, para obtener modelos de desgaste en las herramientas de corte en el proceso de torneado. Para la obtención de datos se hicieron trabajos de mecanizado sobre dos materiales distintos:

Hierro fundido FG15: este es el hierro fundido ordinario, empleado en la construcción de estructuras metálicas; se caracteriza por su bajo costo, sus altas posibilidades de mecanizado y porque en él el carbono tiene forma de grafito.

Aleación de acero EN24: empleada en la fabricación de piezas mecánicas, como ejes en sistemas de bombeo.

Se realizan las pruebas con estos dos tipos de materiales de trabajo con el propósito de probar la validez del modelo del desgaste en la herramienta de corte y su posterior monitoreo.

La herramienta de corte empleada es de material duro sin recubrir de Widia (su código es CCMT 060204 TTS); el Widia se emplea en Guatemala para realizar incrustaciones en buriles HSS-W.

Para cada material de trabajo se realizan cuatro experimentos; las condiciones de corte y los parámetros del proceso son los mismos en cada uno de ellos (tal como la profundidad de corte: 0,7 milímetros).

Se utilizan dos velocidades de corte distintas: 94 metros por minuto y 188 metros por minuto. Para cada una de estas velocidades de corte se emplean dos movimientos de avance: 0,06 milímetros por revolución y 0,08 milímetros por revolución.

En la tabla I se muestran los datos resumidos del total de ocho experimentos (cuatro por cada material de trabajo).

Tabla I. **Condiciones de corte en las operaciones de torneado llevados a cabo**

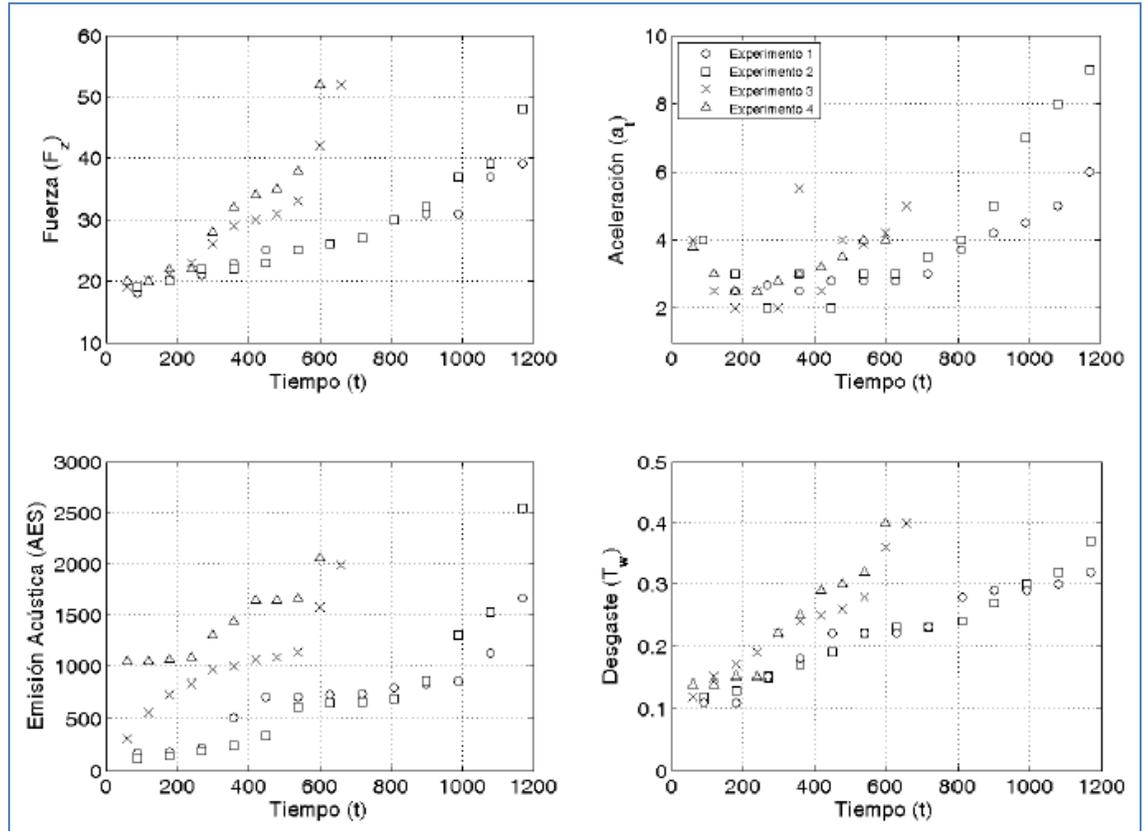
<i>Experimento</i>	<i>Material</i>	<i>Velocidad de corte (m/min)</i>	<i>Avance (mm/rev)</i>	<i>Profundidad de corte (mm)</i>
1	FG 15	94	0.06	0.7
2	FG 15	94	0.08	0.7
3	FG 15	188	0.06	0.7
4	FG 15	188	0.08	0.7
5	En24	94	0.06	0.7
6	En24	94	0.08	0.7
7	En24	188	0.06	0.7
8	En24	188	0.08	0.7

Fuente: GAJATE MARTIN, Agustín. *Control de mecanizado de alto rendimiento*. p. 137.

El desgaste de la herramienta de corte fue medido *off-line* empleando un microscopio; no se emplearon fluidos de corte en esta plataforma experimental.

En la figura 40 se muestran los datos de tiempo, fuerza, aceleración de vibraciones, emisión acústica y desgaste de la herramienta en cada experimento con el hierro fundido gris FG15.

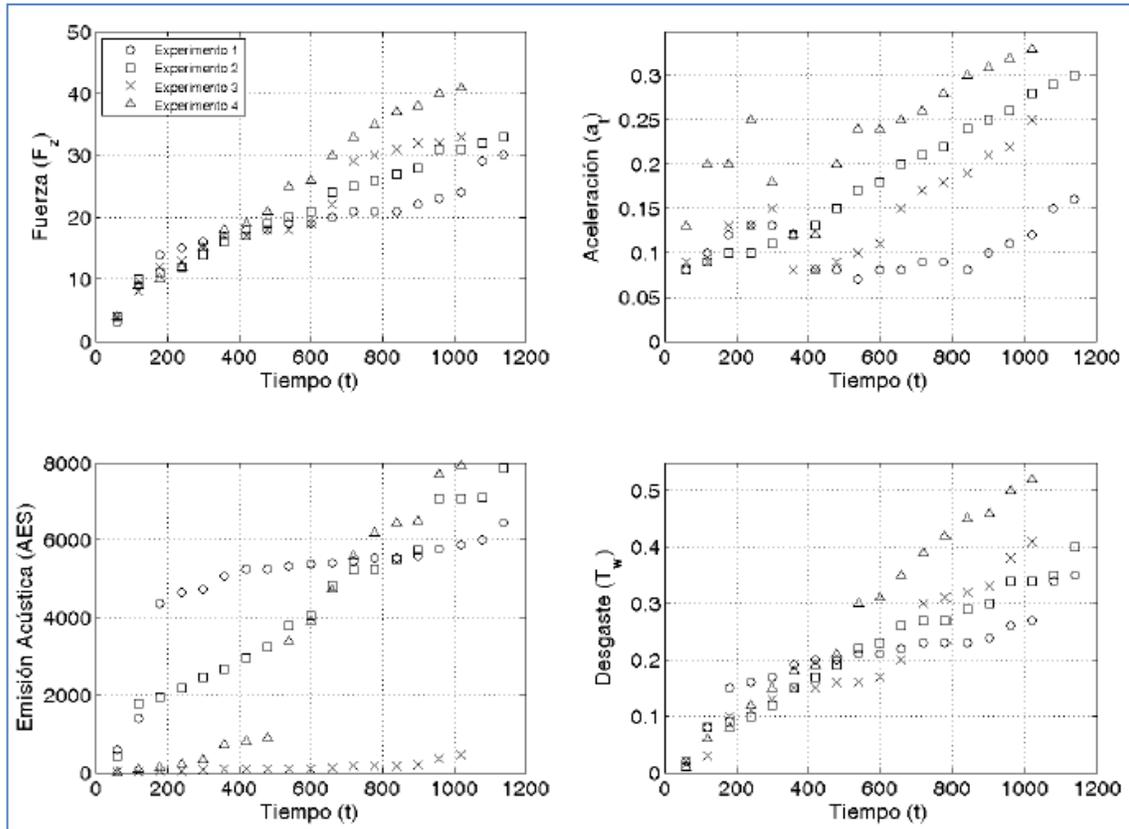
Figura 40. Datos obtenidos en cada experimento con el hierro fundido gris: \diamond experimento 1, \square experimento 2, X experimento 3, Δ experimento 4



Fuente: GAJATE MARTIN, Agustín. *Control de mecanizado de alto rendimiento*. p. 138.

En la figura 41 se muestran los datos de tiempo, fuerza, aceleración de vibraciones, emisión acústica y desgaste de la herramienta en cada experimento con la aleación de acero EN24.

Figura 41. Datos obtenidos en cada experimento con la aleación de acero EN24: \diamond experimento 1, \square experimento 2, \times experimento 3, \triangle experimento 4



Fuente: GAJATE MARTIN, Agustín. *Control de mecanizado de alto rendimiento*. p. 138.

4.4. Monitoreo inteligente en el proceso de torneado

En el capítulo 3 de este trabajo se explicaron algunos métodos para el monitoreo del desgaste en herramientas de corte, desgaste que, a su vez, es crucial en la maximización de la producción y automatización de procesos de mecanizado.

El desgaste en herramientas de corte es intrínseco al proceso de mecanizado por arranque de viruta y, además es difícil de predecir por su naturaleza no lineal.

En este trabajo se proponen métodos de monitoreo del desgaste a nivel experimental con el fin de que este se conozca a profundidad y, además puedan surgir prácticas adecuadas en el trabajo cotidiano para minimizar los efectos de este desgaste.

En el monitoreo de desgaste de herramientas de corte, por medio del método directo de procesamiento de señales, la tecnología de medición es demasiado cara, para que pueda aplicarse en la práctica y pueden darse errores por las condiciones ambientales de una máquina-herramienta (viruta o el líquido refrigerante); por el contrario, en el método indirecto se emplean parámetros más fáciles de medir, pero la carga computacional es demasiado alta.

Los sistemas inteligentes (en sí los conocidos como neuroborrosos) posibilitan un adecuado monitoreo experimental de desgaste en herramientas de corte, básicamente porque operan muy bien en situaciones en las cuales impera la incertidumbre. Este monitoreo se le conoce como neuroborroso y es capaz, asimismo de tratar con las no linealidades del proceso de torneado.

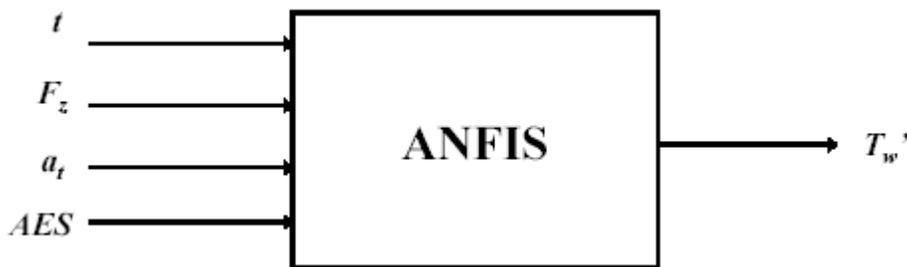
4.4.1. Monitoreo con ANFIS

En un Sistema de inferencia borrosa basado en redes (ANFIS por sus siglas en inglés) las reglas de incertidumbre se obtienen del propio proceso a monitorear.

Esas reglas de incertidumbre o borrosas se obtienen por medio de una estrategia de descomposición y deben proporcionar la información necesaria del comportamiento global del proceso.

En el caso del torneado, de acuerdo con la plataforma experimental del punto 4.3, se procede a crear un modelo con ANFIS de entradas y salidas como se muestra en la figura 42.

Figura 42. **Modelo de entradas y salidas con ANFIS para el proceso de torneado**



Fuente: GAJATE MARTIN, Agustín. *Control de mecanizado de alto rendimiento*. p. 138.

En la figura 42, las señales de entrada representadas son:

- t : es el tiempo de duración del proceso de torneado.
- F_z : es la fuerza de corte en la dirección de la velocidad de corte, en este caso el eje z.
- a_t : representa la aceleración de las vibraciones de la herramienta de corte.
- AES: es la señal de emisión acústica.

La variable de salida en la figura 42 es T_w y representa el desgaste de la herramienta de corte. El uso de las cuatro señales de entrada se debe a que todas y cada una de ellas proporcionan información relevante sobre el desgaste en la herramienta de corte.

La eliminación de alguna de las señales de entrada deteriora en gran medida el monitoreo del proceso de torneado. Así, el desgaste de la herramienta de corte en el proceso de torneado puede representarse de la siguiente forma:

$$T_w = H(t, F_z, a_t, AES)$$

En esta ecuación H representa al ANFIS.

El TAE (error medio total) es un índice de comportamiento del modelo ANFIS mostrado en la figura 41 y muestra la precisión y exactitud del mismo. El TAE viene dado así:

$$TAE = (1/n) \sum_n \frac{|T_w - T_w'|}{T_w} * 100$$

T_w es el desgaste real de la herramienta de corte, T_w' es el desgaste de la herramienta de corte determinado por el modelo ANFIS y n es el número de datos de cada experimento.

Se desarrolló un modelo ANFIS, basándose en la plataforma experimental del punto 4.3. para cada uno de los materiales empleados como piezas de trabajo (hierro fundido FG15 y acero aleado En24).

Se inicia la obtención del modelo ANFIS con la aplicación de un algoritmo de agrupamiento substractivo el cual se basa en la idea de que cada punto de un conjunto de datos es el centro potencial de un grupo de datos.

Posteriormente se calcula la probabilidad de que efectivamente un conjunto de datos sea el centro potencial de un grupo de datos, basándose en la densidad de datos que haya en el entorno de cada punto del conjunto de datos.

El algoritmo de agrupamiento substractivo selecciona los puntos que tienen la mayor probabilidad de ser el centro del primer grupo, eliminando a continuación todos los puntos del conjunto de datos que estén en las proximidades de ese centro del primer grupo (lo cual se determina por el radio escogido como parámetro), esto con el fin de determinar el próximo grupo de datos con su respectivo centro.

El algoritmo realiza iteraciones hasta que todos los datos estén dentro del radio de alguno de los grupos creados. De esta manera, como parámetro únicamente se emplean los radios de los conjuntos de datos de cada una de las variables de entrada y de la variable única de salida.

Al efectuar un análisis de los datos se seleccionaron los radios siguientes:

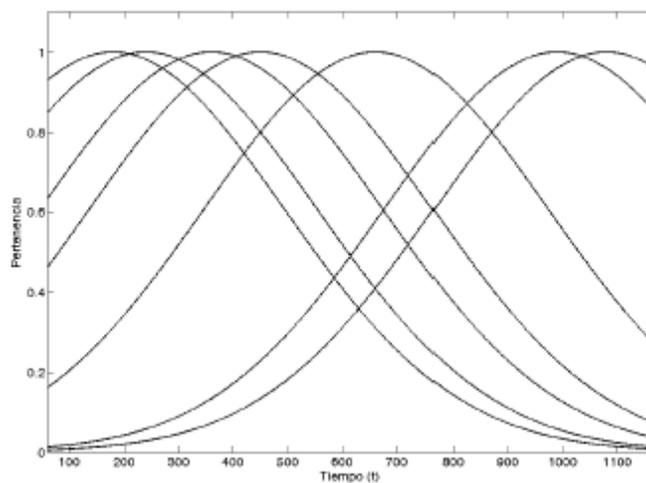
- $t: 0,8$
- $F_z: 0,4$
- $\alpha_i: 0,5$
- AES: 0,5
- $TW': 0,3$

Luego de aplicar el algoritmo de agrupamiento substractivo con estos parámetros, se crea un sistema borroso con 7 reglas para el caso del material hierro fundido FG15 y 11 reglas para el caso del material de aleación de acero EN24; en cada uno de estos casos existen tantas funciones de pertenencia como reglas se han creado. En la figura 43 se muestran las funciones de pertenencia para el caso del material hierro fundido FG15, de la siguiente forma:

- a) tiempo
- b) fuerza de corte en el eje z
- c) aceleración de vibraciones
- d) señal de emisión acústica

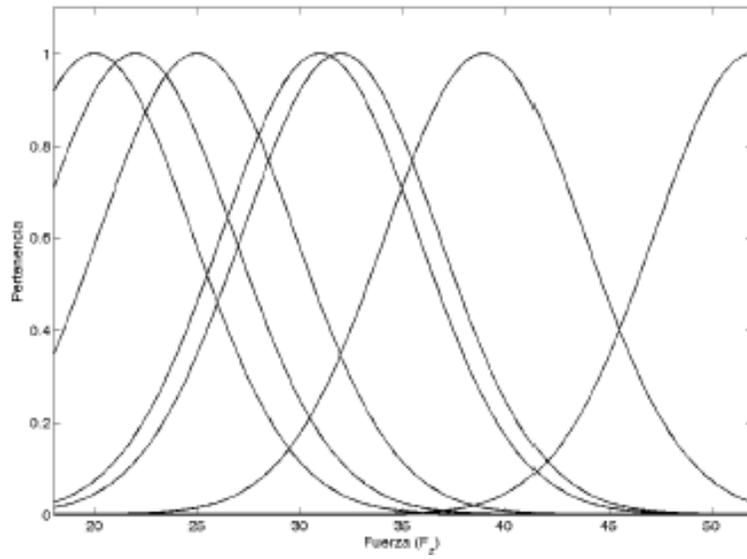
Figura 43. **Funciones de pertenencia para el caso del material hierro fundido FG15**

a)

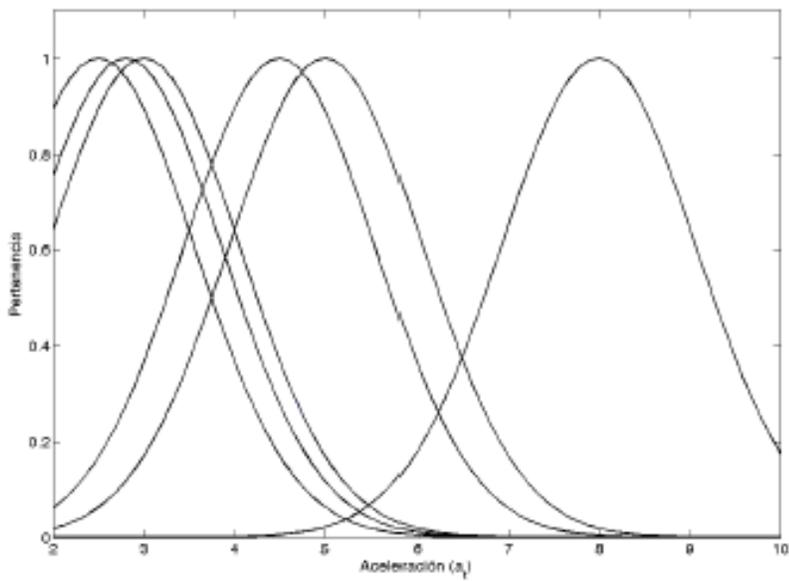


Continuación de la figura 43.

b)

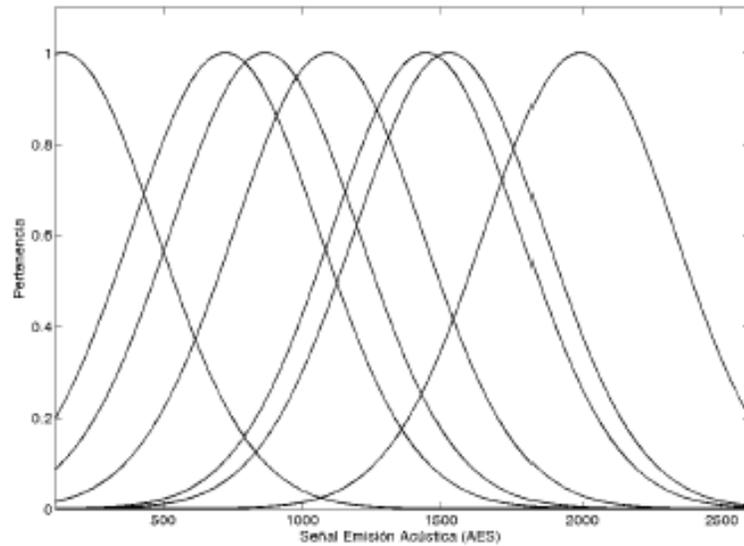


c)



Continuación de la figura 43.

d)



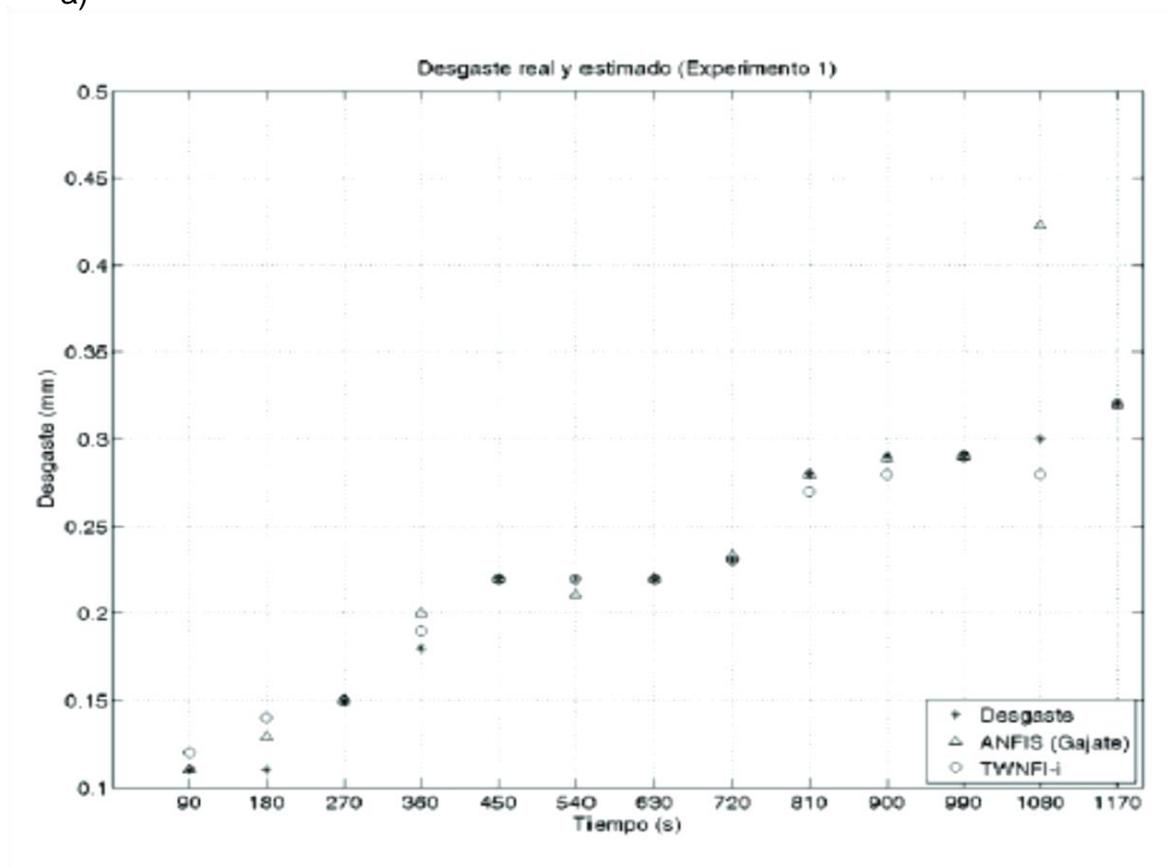
Fuente: GAJATE MARTIN, Agustín. *Control de mecanizado de alto rendimiento*. p. 144.

Los resultados del desgaste en milímetros de la herramienta de corte en función del tiempo en segundos, durante el proceso de torneado del hierro fundido FG 15, obtenidos con ANFIS, se muestran en la figura 44 de la siguiente forma:

- a) experimento 1
- b) experimento 2
- c) experimento 3
- d) experimento 4

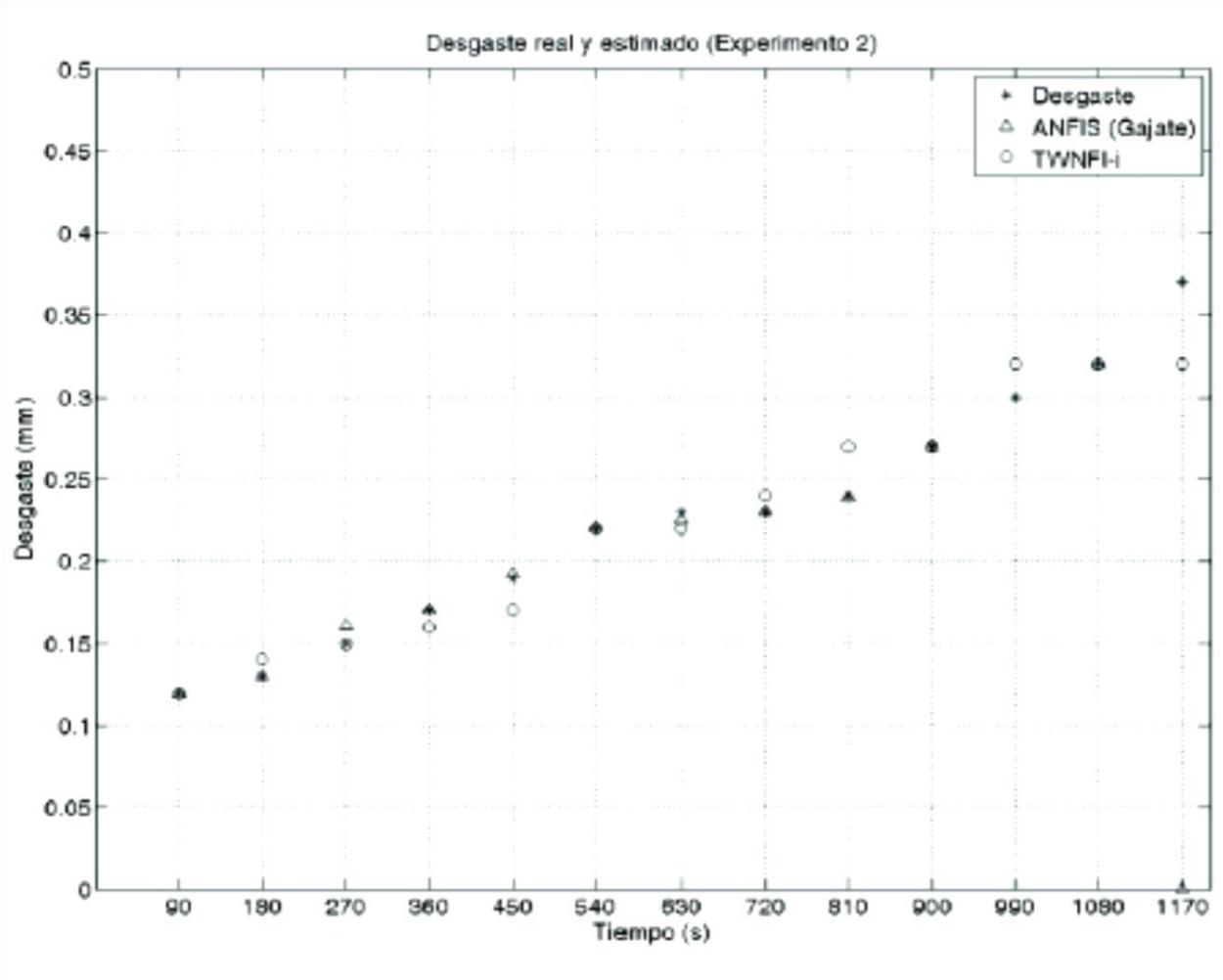
Figura 44. Datos del desgaste de la herramienta de corte en el proceso de torneado del hierro fundido FG15

a)



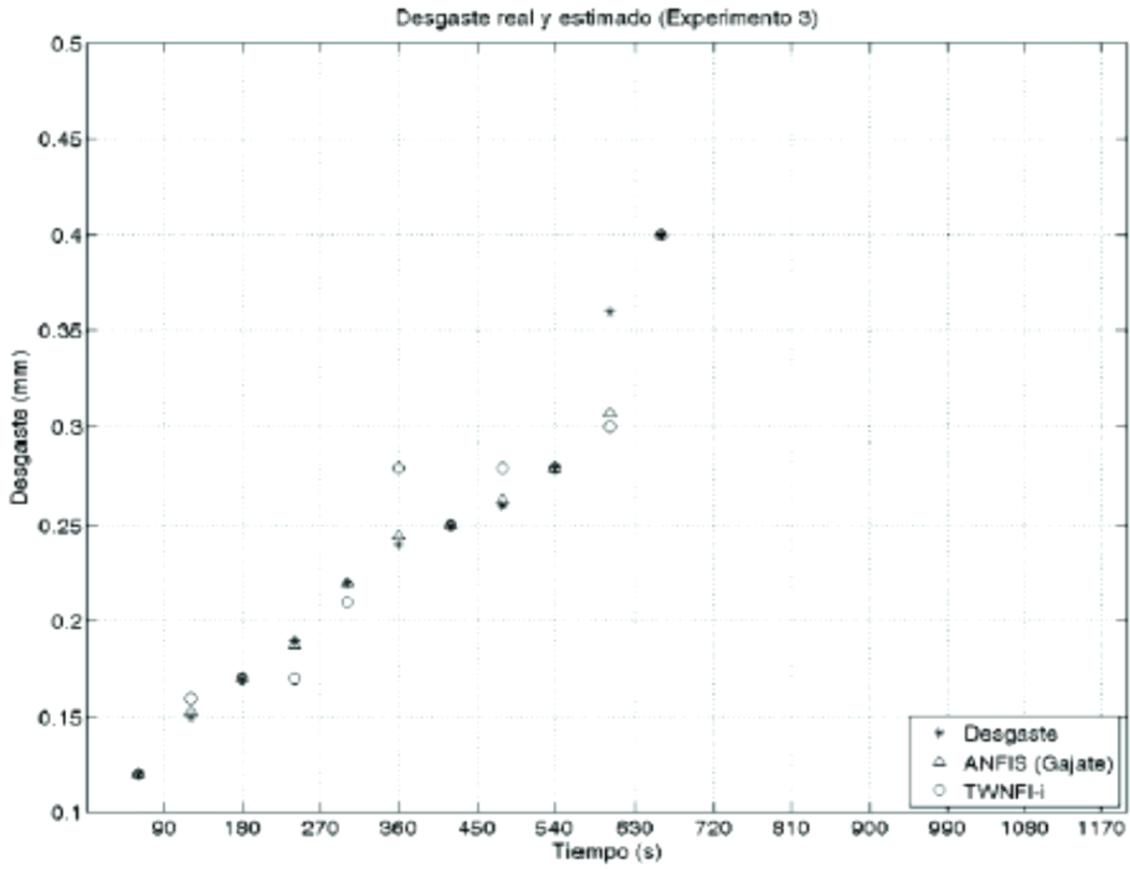
Continuación de la figura 44.

b)



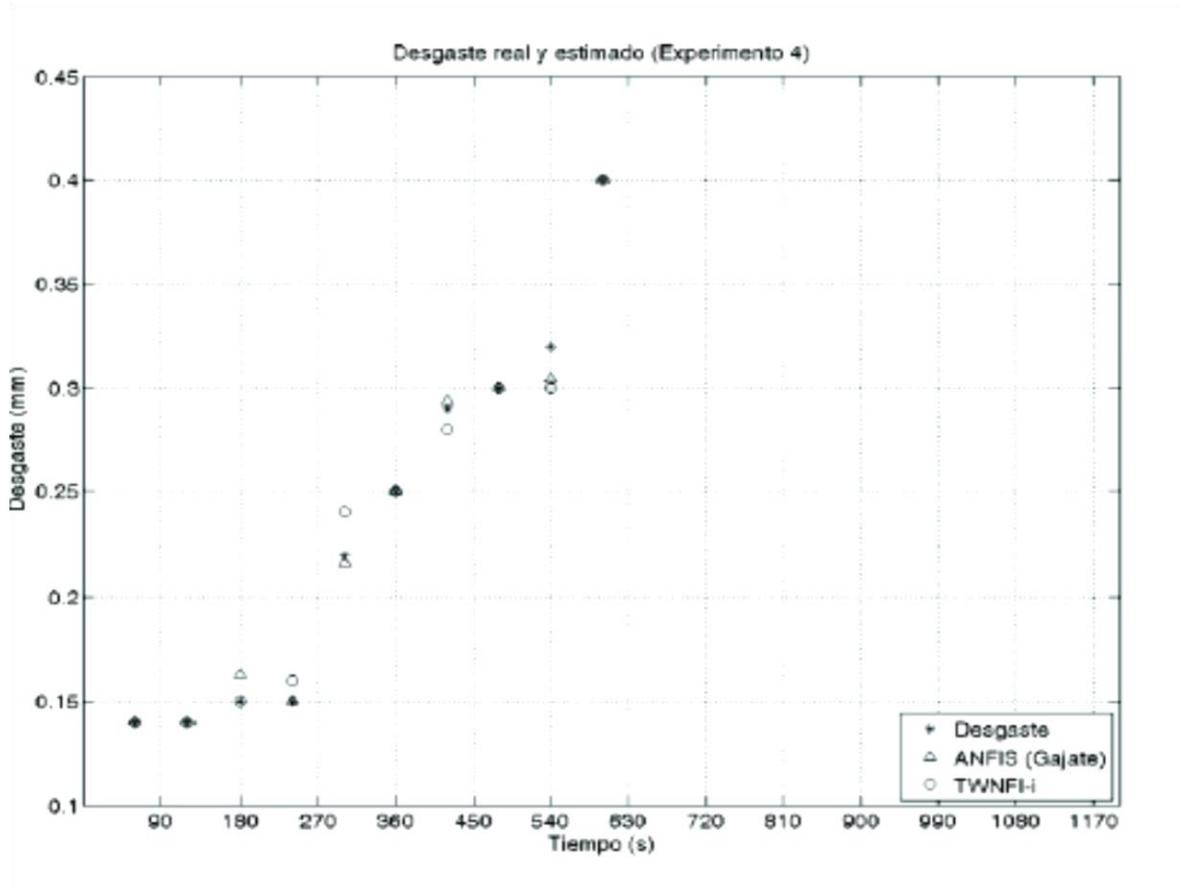
Continuación de la figura 44.

c)



Continuación de la figura 44.

d)



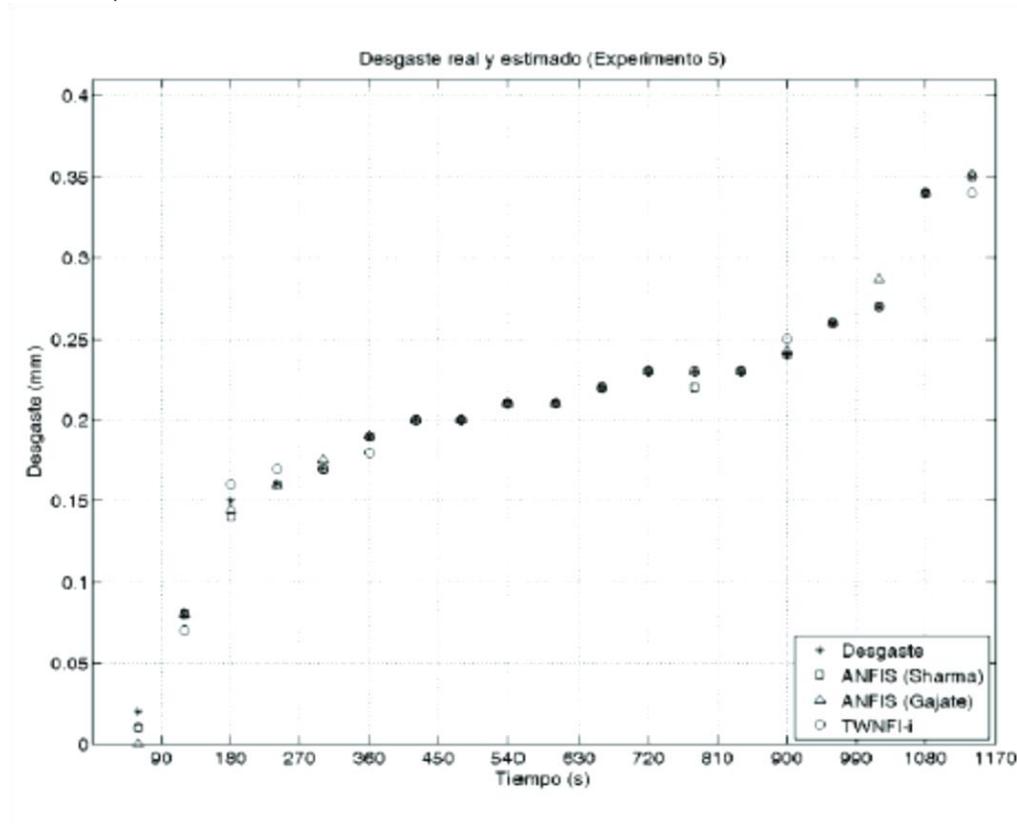
Fuente: GAJATE MARTIN, Agustín. *Control de mecanizado de alto rendimiento*. p. 151.

Los resultados del desgaste en milímetros de la herramienta de corte en el proceso de torneado del acero aleado EN24, obtenidos con ANFIS, se muestran en la figura 45 de la siguiente forma:

- a) experimento 5
- b) experimento 6
- c) experimento 7
- d) experimento 8

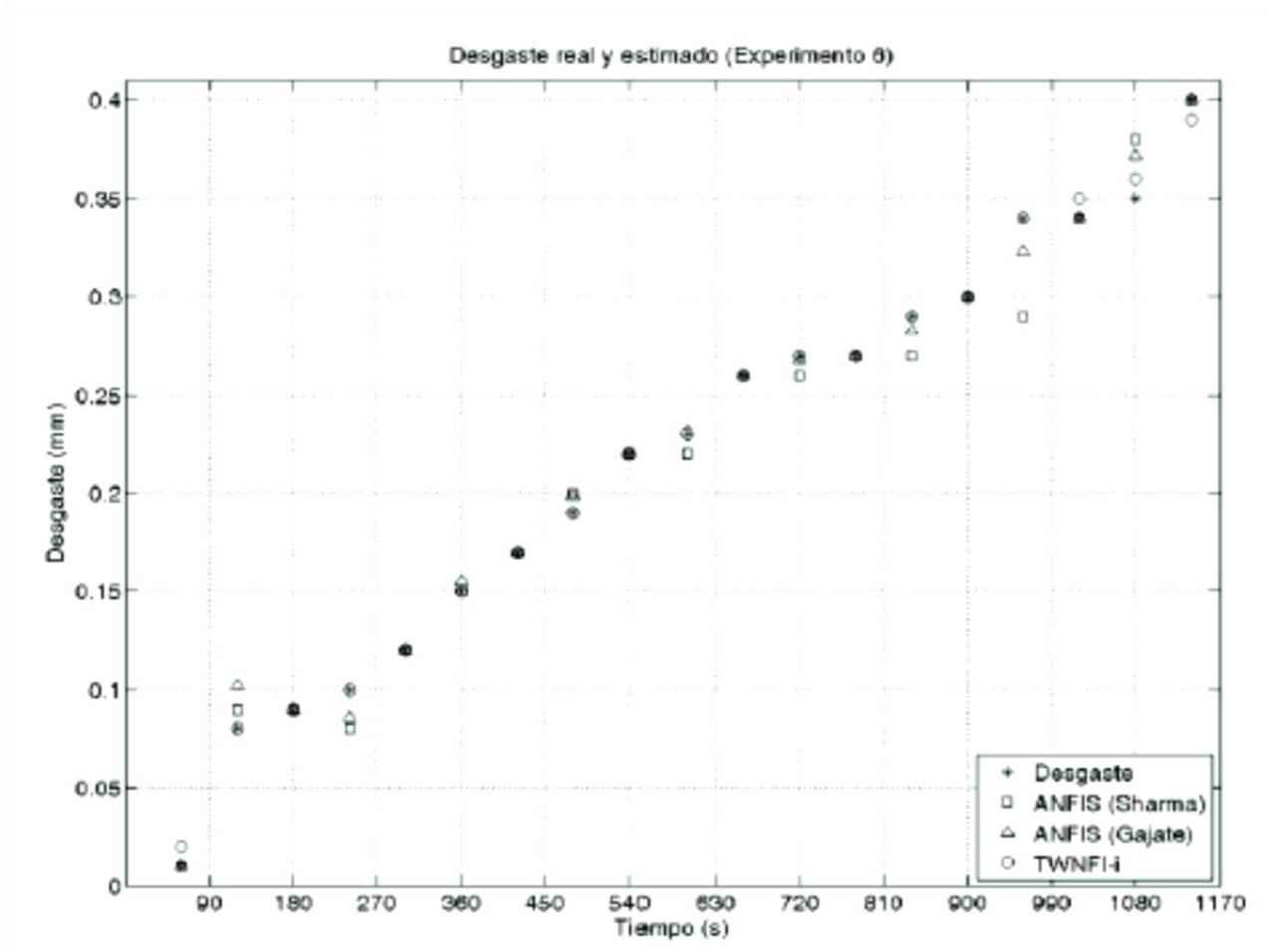
Figura 45. **Datos del desgaste de la herramienta de corte en el proceso de torneado del acero aleado EN24**

a)



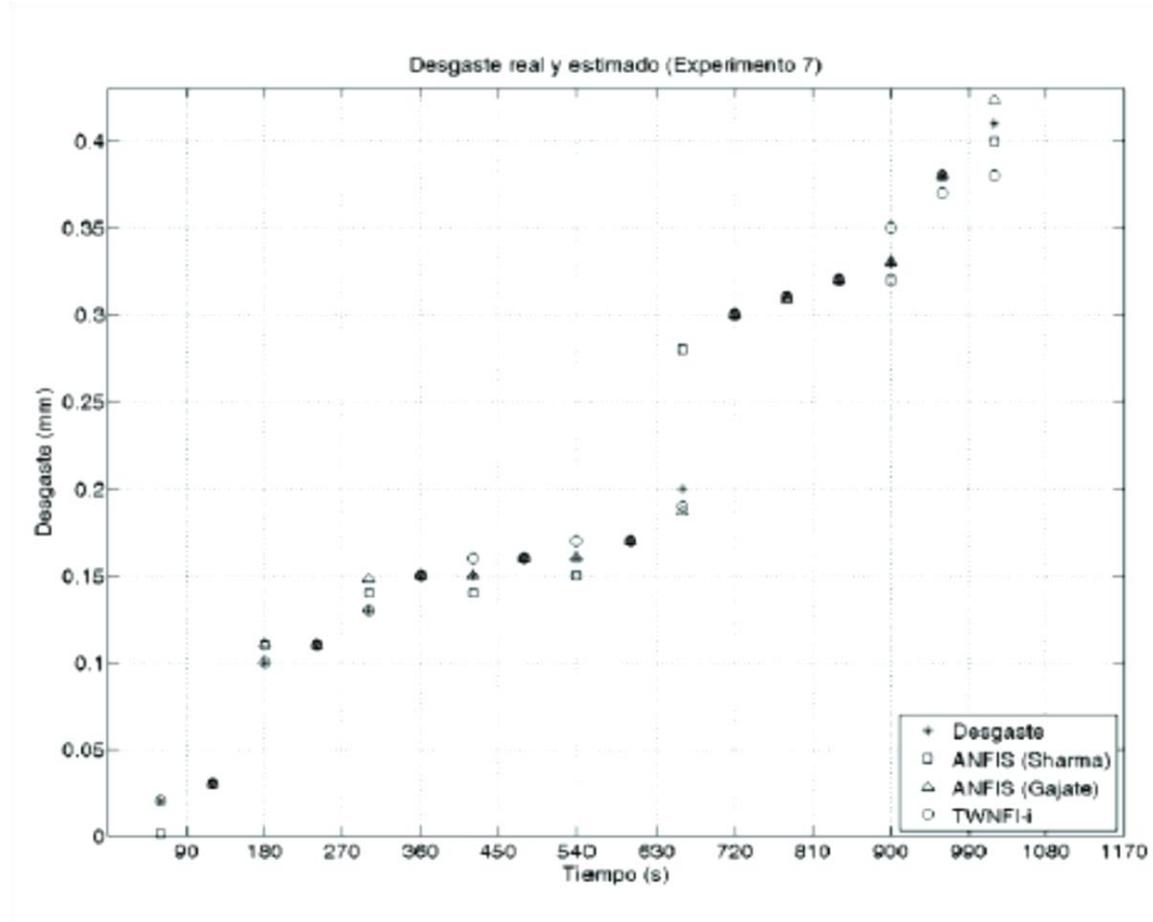
Continuación de la figura 45.

b)



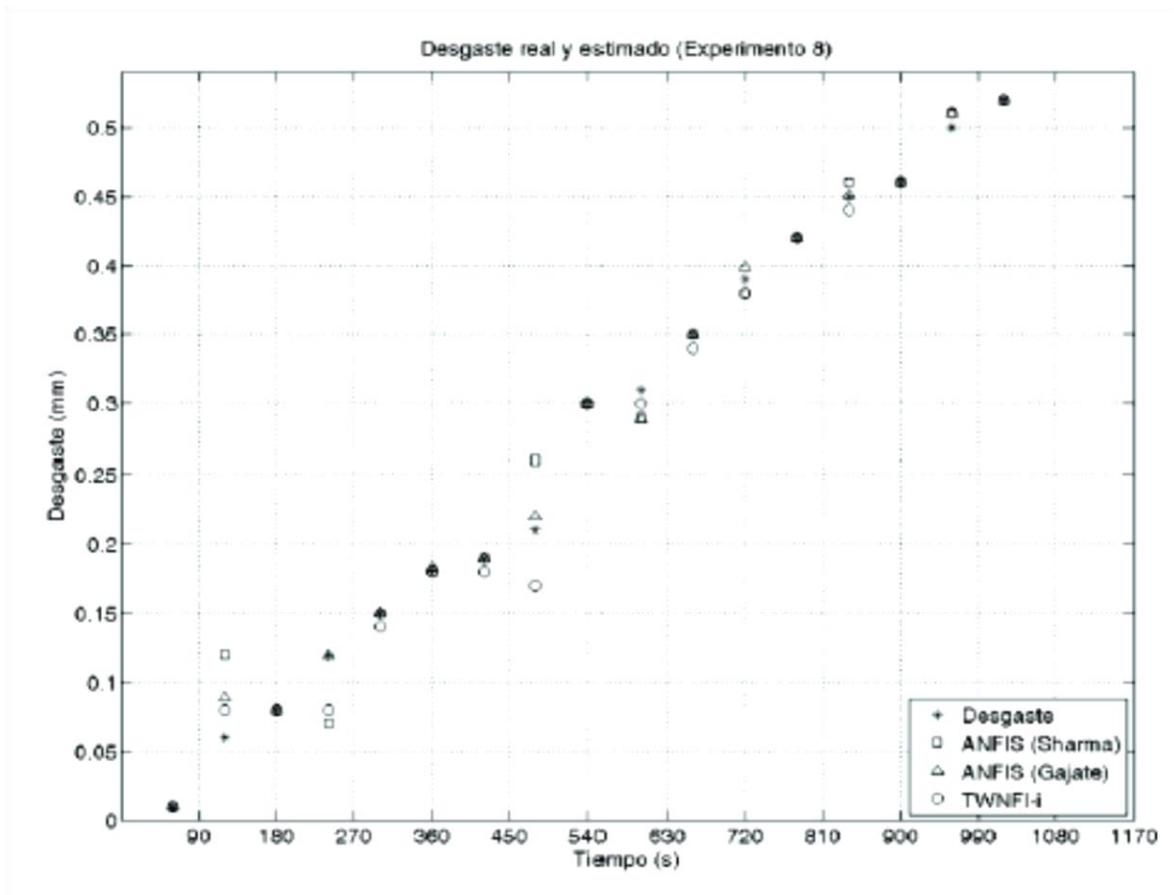
Continuación de la figura 45.

c)



Continuación de la figura 45.

d)



Fuente: GAJATE MARTIN, Agustín. *Control de mecanizado de alto rendimiento*. p. 152.

Al obtenerse el modelo ANFIS para cada material de piezas de trabajo, se probó este modelo con una serie de 4 experimentos, obteniéndose 1 TAE en cada uno de ellos. En la tabla II se muestran los valores de TAE para los experimentos con el hierro fundido FG15.

Tabla II. **Valores de TAE para los experimentos con el hierro fundido FG15**

Experimento	TAE
1	5.85%
2	41.79%
3	1.89%
4	1.65%

Fuente: GAJATE MARTIN, Agustín. *Control de mecanizado de alto rendimiento*. p. 148.

En la tabla III se muestran los valores de TAE para los experimentos con la aleación de acero EN24.

Tabla III. **Valores de TAE para los experimentos con aleación de acero En24**

Experimento	TAE
5	6.19%
6	3.42%
7	8.30%
8	3.93%

Fuente: GAJATE MARTIN, Agustín. *Control de mecanizado de alto rendimiento*. p. 148.

5. MONITOREO DEL FRESADO DE MOLDES EN TIEMPO REAL MEDIANTE REDES DE SEÑALES INTERNAS

En el medio nacional, las fresadoras CNC se suelen emplear para fabricar moldes utilizables en la industria plástica y también, para fabricar sellos mecánicos empleados en bombas, compresores y sistemas óleo-hidráulicos. Estas piezas no se producen en serie, sino de una en una, lo cual conlleva una dificultad al aplicar un método, aparte del visual, para detectar desgaste en las herramientas de corte.

El material que, comúnmente, se mecaniza con máquinas-herramientas CNC es el acero duro; otro material mecanizado es el aluminio.

El principal criterio para la elección de una herramienta de corte (buril, fresa o inserto) a usarse en una máquina-herramienta CNC es el material de la pieza de trabajo; el rango de velocidades de giro suele variar según el diámetro de la pieza de trabajo (por ejemplo 2 000 rpm para diámetros pequeños y 800 rpm para diámetros grandes).

En Guatemala, la mayoría de las herramientas de corte empleadas en máquinas-herramientas CNC son de tungsteno con revestimientos de cobalto o de titanio.

En algunos talleres de metal-mecánica, los porta-buriles de los tornos CNC se han sustituido por portainsertos; así, los buriles se sustituyen por insertos de tungsteno con revestimiento de titanio.

En el fresado de moldes, naturalmente, se presentan esfuerzos notables en la herramienta de corte o fresa. Se muestra en la figura 46 el fresado de un molde de aluminio.

Figura 46. **Fresado de un molde de aluminio**



Fuente: www.revistatope.com. Consulta: 4 de abril de 2012.

Algunas de las operaciones comunes en el fresado de moldes son:

- Mecanizado a escuadra
- Mecanizado de ranuras
- Fabricación de perfiles

En este capítulo se propone un método experimental para la evaluación del desgaste de herramientas de corte empleadas en el fresado de moldes, utilizando para esta evaluación señales internas del control de la fresadora.

La metodología empleada permite la detección en tiempo real del desgaste de la herramienta de corte o fresa. Se identifican los que se conocen como descriptores, los cuales tienen la capacidad de discriminar los estados de la herramienta de corte.

Asimismo, se incluye un sistema automatizado que propone y procesa transformaciones de las señales y selecciona los descriptores más relevantes del proceso de fresado de moldes; estos descriptores son las señales de entrada de la red y el método de extracción de los mismos es capaz de identificar entre cientos de parámetros aquellos que se relacionan mejor con el estado de la herramienta de corte.

5.1. Redes neuronales

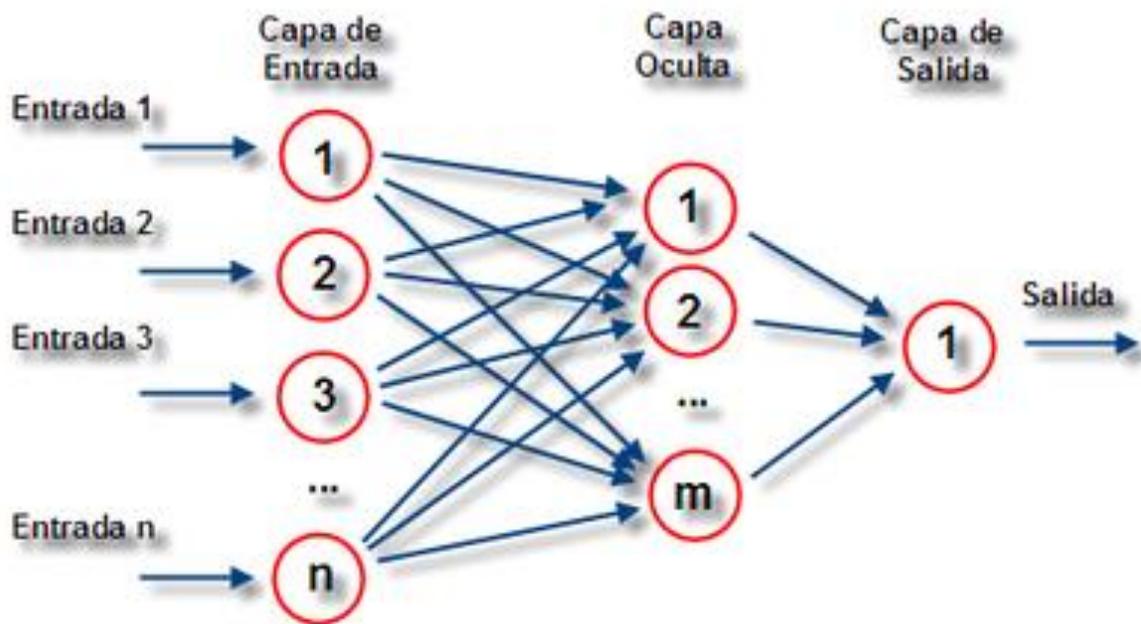
Como se mencionó en el capítulo 4, las redes neuronales forman parte de lo que se conoce como inteligencia artificial y son estructuras de procesamiento de información, formadas por elementos interconectados mediante canales unidireccionales de información.

Una red neuronal se basa en el funcionamiento del sistema nervioso humano, en el cual un sistema interconectado de neuronas en red posibilita un estímulo de salida. Cada neurona de la red recibe señales de entrada a través de interconexiones y emite una señal de salida, la cual viene dada por tres funciones:

- Excitación: por lo general es la sumatoria de las señales de entrada multiplicada por el peso de su interconexión, es decir su valor neto.
- Activación: esta modifica la función de excitación.
- Función de transferencia: se utiliza para acotar la salida de la neurona y viene dada por la interpretación que se le dé a la dicha salida; en sí es la relación entre la señal de salida y la de entrada.

En la figura 47 se muestra una red neuronal simple.

Figura 47. **Red neuronal artificial simple en la que cada círculo representa una neurona**



Fuente: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/64/RedNeuronalArtificial.png/400px-RedNeuronalArtificial.png>. Consulta: 4 de abril de 2012.

Los datos ingresan a la red neuronal por la capa de entrada, luego pasan a la capa oculta (la cual a su vez puede estar constituida por varias capas) y por último llegan a la capa de salida.

En la capa oculta se procesa la información proveniente de la capa de entrada; en esta capa oculta se genera cualquier tipo de representación interna de la información. Se le llama oculta porque no tiene relación directa ni con la entrada ni con la salida.

A partir de las neuronas de una red neuronal artificial se pueden hacer representaciones específicas, de tal forma que pueden formar una letra, un número o un objeto.

5.1.1. Redes neuronales en el monitoreo del desgaste de herramientas de corte

El método de monitoreo experimental propuesto, empleando una red neuronal, se caracteriza por lo siguiente:

- Se usan señales de sensores internos de control como datos de entrada.
- El desarrollo de un módulo de extracción de descriptores, el cual es capaz de identificar de entre cientos de parámetros, aquellos que mejor se relacionan con el estado de la herramienta de corte o fresa.

La eficacia de las redes neuronales diseñadas para predecir el desgaste de las herramientas de corte abarca un amplio intervalo de condiciones de corte, lo que se detalla a continuación:

- Velocidad de corte: 100-120 m/min
- Movimiento de avance: 0,1 – 0,2 mm

- Profundidad: 1 – 2 mm

Las señales de entrada se obtienen de los movimientos de los ejes y del cabezal de la fresadora CNC. Las redes neuronales son una herramienta adecuada para gestionar, como en este caso, parámetros múltiples; el método planteado permite la extracción de los llamados descriptores, evaluando de forma simultánea cientos de parámetros.

Cabe mencionar que las señales útiles relacionadas con la evolución del estado de la herramienta de corte o fresa han sido las de corriente en el servomotor de la fresadora CNC y de velocidad instantánea en los ejes de la fresadora y en el cabezal.

Al implementar una red neuronal, la solución depende del objetivo perseguido. En el caso de la evaluación del estado de la herramienta de corte o fresa se tiene que:

- Se identifica el momento en que debe sustituirse la herramienta de corte o fresa, por estar esta ya desgastada; esta propiedad se conoce como clasificación en la red neuronal
- Se efectúa una estimación continua del estado de la herramienta de corte o fresa; esta propiedad se conoce como predicción en la red neuronal

Desde un punto de vista práctico, basta con saber en que momento se debe sustituir la fresa y este es un objetivo relativamente fácil de alcanzar, porque requiere de un menor esfuerzo experimental.

5.2. Plataforma experimental

Para efectos de este trabajo de graduación los ensayos de mecanizado se realizaron con una fresadora CNC marca Soraluce, de bancada fija. La pieza de trabajo es un molde de calidad AISI L6, tratada a 40 HRc; el fresado se efectúa con un portaherramientas de 5 insertos circulares recubiertos de TiN (nitruro de titanio) sin lubricación.

En la figura 48 se muestra el proceso de mecanizado del molde con la herramienta de corte o fresa realizando pasadas sucesivas de fresado planeado.

Figura 48. **Proceso de fresado de moldes con la plataforma experimental**

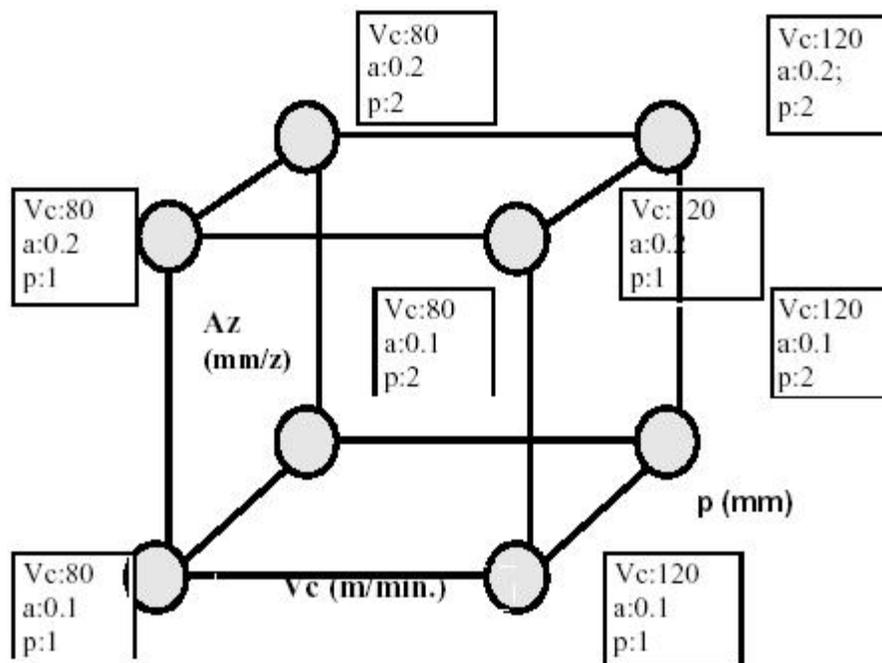


Fuente: ETXEBERRIA, Juan. *Monitoreo del fresado de moldes*. p. 4.

El fresado se realiza siempre en la dirección longitudinal de la mesa, con una pasada lateral fija de 50 milímetros. Las señales externas adquiridas fueron las de esfuerzo de corte, las cuales se obtuvieron con un captador dinamométrico, colocado en el cabezal (no mostrado en la figura 48).

En la figura 49 se muestra un cubo, en el que cada vértice representa un ensayo de fresado del molde; se observa que en uno de los vértices están los valores de velocidad de corte 80 metros por minuto, movimiento de avance 0,2 milímetros y profundidad 2 milímetros. Esto indica que se hizo un ensayo del fresado del molde con estos valores y es lo que se representa en el vértice del cubo. Cada vértice representa un ensayo diferente y cada uno de estos ensayos se repitió dos veces.

Figura 49. Condiciones de cada uno de los ensayos



Fuente: ETXEBERRIA, Juan. *Monitoreo del fresado de moldes*. p. 5.

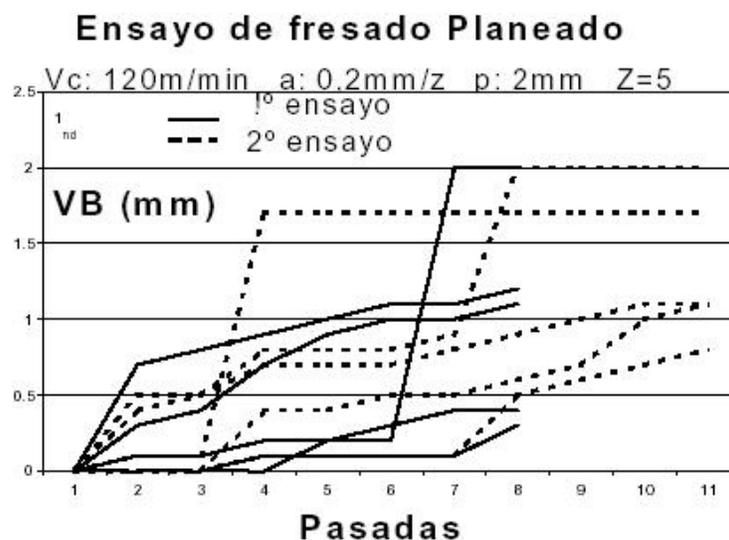
La evolución del desgaste de la herramienta de corte o fresa se registra con una cámara CCD colocada en un dispositivo sobre la mesa de la fresadora.

Con la cámara CCD se consiguen datos inmediatos del desgaste de los 5 insertos, tras cada serie de pasadas de corte, con la ventaja de no tener que montar y desmontar la herramienta de corte o fresa durante el ensayo.

La evolución del desgaste de los insertos fue bastante impredecible. En lugar de presentarse un desgaste uniforme y progresivamente creciente, se observan repentinas roturas (micro y macro astillado), a veces incluso en la primera pasada.

En la figura 50 se muestra la evolución del desgaste de los insertos utilizados en las condiciones de fresado más severas.

Figura 50. **Evolución del desgaste de los insertos utilizados en los ensayos de fresado del molde; VB es el desgaste de flanco**



Fuente: ETXEBERRIA, Juan. *Monitoreo del fresado de moldes*. p. 6.

En la figura 51 se muestran los mecanismos de micro y macro astillado en uno de los insertos de la herramienta de corte o fresa.

Figura 51. **Mecanismos de micro y macro astillado en un inserto de la herramienta de corte**



Fuente: ETXEBERRIA, Juan. *Monitoreo del fresado de moldes*. p. 6.

El astillado es un fenómeno del desgaste de la herramienta de corte o fresa relacionado con la fatiga, como consecuencia del corte intermitente en un material de dureza elevada como el AISI L6 (el cual tiene una dureza de 40 HRc).

5.3. Sensibilidad de las señales internas del CNC

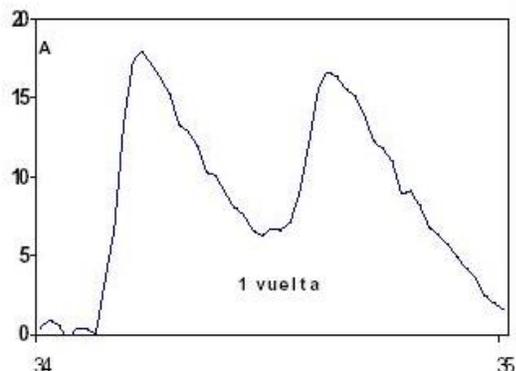
Como se indicó en el punto 3.1.1. de este trabajo, sensibilidad es la característica que indica la mayor o menor variación de la salida de un transductor por unidad de la variable de entrada.

Entre las señales de control analizadas, las de mayor utilidad fueron las de corriente en los servomotores y las de velocidad instantánea tanto en los ejes como en el cabezal de la fresadora CNC.

5.3.1. Comparación entre la señal de la corriente en el cabezal y las señales externas de la fresadora CNC

En la figura 52 se muestra la señal de la corriente del servomotor del cabezal de la fresadora CNC, durante una vuelta del cabezal en el proceso de fresado del molde.

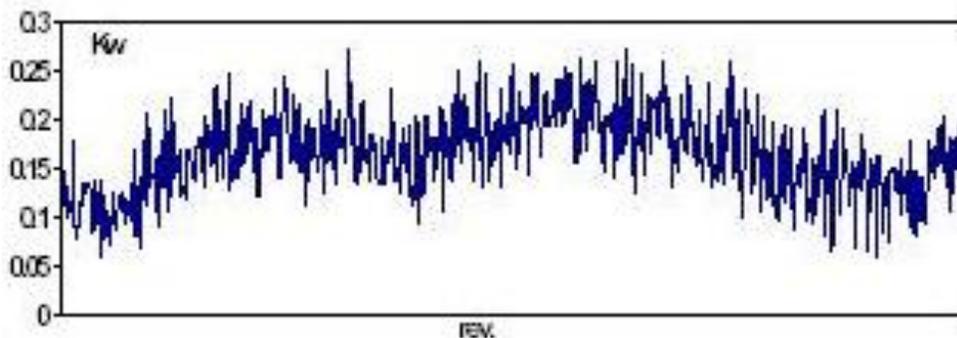
Figura 52. Señal de la corriente instantánea en amperios del servomotor del cabezal de la fresadora CNC; se toma como referencia la vuelta 34



Fuente: ETXEBERRIA, Juan. *Monitoreo del fresado de moldes*. p. 7.

Se muestra en la figura 53 la demanda de potencia consumida por la fresadora CNC durante uno de los ensayos de mecanizado de moldes; esta demanda de potencia fue obtenida mediante un analizador de redes.

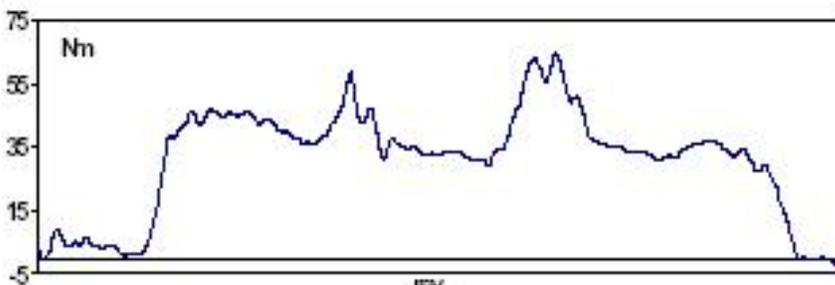
Figura 53. **Potencia demandada por la fresadora CNC en uno de los ensayos de mecanizado de moldes**



Fuente: ETXEBERRIA, Juan. *Monitoreo del fresado de moldes*. p. 7.

En la figura 54 se muestra la evolución de la señal externa del par torsor en Newton metro (captada mediante un transductor dinamométrico rotativo marca Kistler), del cabezal de la fresadora CNC.

Figura 54. **Evolución del par torsor en Nm del cabezal de la fresadora CNC**



Fuente: ETXEBERRIA, Juan. *Monitoreo del fresado de moldes*. p. 7.

Las señales de las figuras 52, 53 y 54 corresponden al mismo ensayo y a su vez, pueden representar a cualquiera de los ensayos realizados.

Se debe señalar que la herramienta de corte o fresa tiene 5 insertos, pero que solo 2 de ellos están instantáneamente en contacto con el material de trabajo o molde. Puede observarse (figura 52) que la corriente en el servomotor del cabezal de la fresadora CNC es más sensible al proceso de fresado de molde que la potencia demandada (figura 53) o que el par torsor del cabezal de la fresadora CNC (figura 54).

5.3.2. Sensibilidad de las señales internas del proceso de fresado de moldes con respecto a los parámetros de corte

Con el fin de comprobar la utilidad de las señales internas del proceso de fresado de moldes, se compararon estas señales con los parámetros de corte.

Efectivamente, las señales internas del proceso de fresado de moldes, tal como la de corriente en el servomotor del cabezal son muy sensibles a los parámetros de corte.

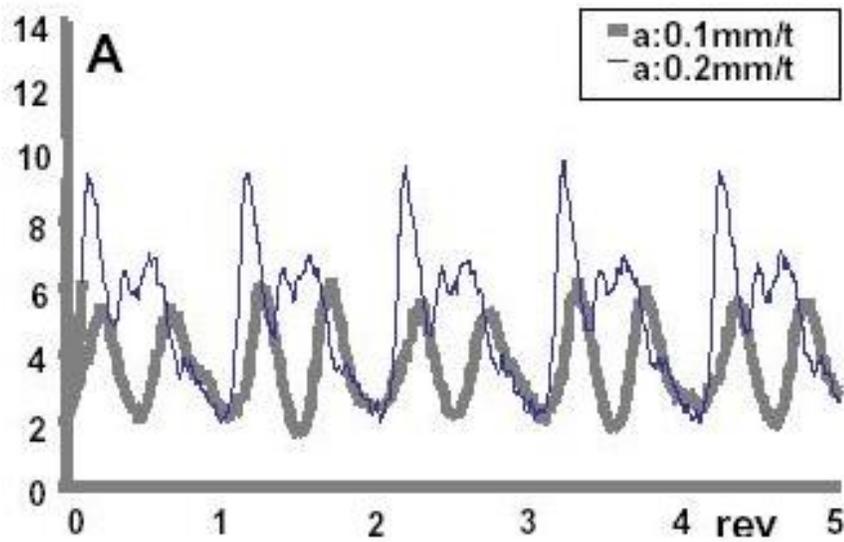
La corriente en el servomotor aumenta drásticamente al aumentar a su vez los parámetros de corte (es decir al hacerse más severas las condiciones del ensayo). Se muestra en la figura 55 la corriente en el servomotor del cabezal con los siguientes parámetros de corte:

- Velocidad de corte: 80 m/min
- Profundidad: 1 mm

Movimiento de avance: 0,1 mm (en línea gris)

Movimiento de avance: 0,2 mm (en línea azul)

Figura 55. **Señal de corriente en el servomotor del cabezal con velocidad de corte 80 m/min y profundidad de 1 mm**

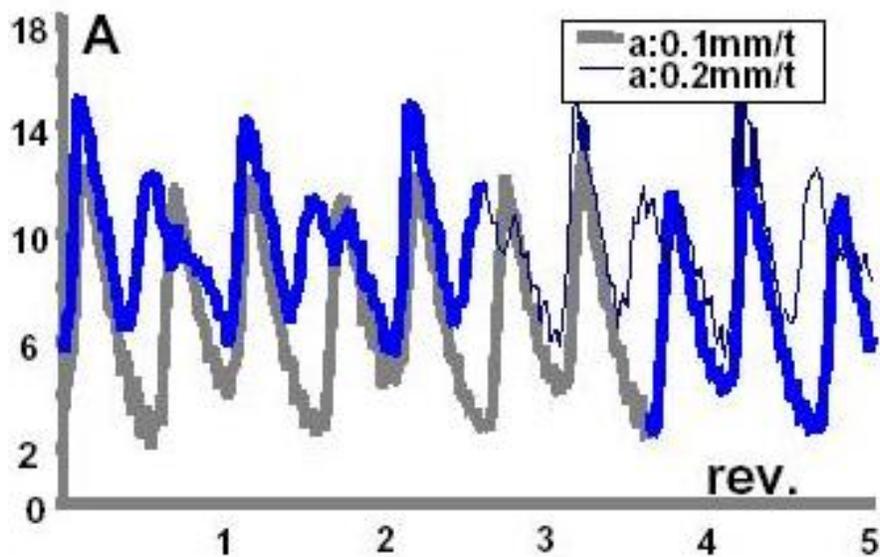


Fuente: ETXEBERRIA, Juan. *Monitoreo del fresado de moldes*. p. 8.

Se muestra en la figura 56 la corriente en el servomotor del cabezal con los siguientes parámetros de corte:

- Velocidad de corte: 120 m/min
- Profundidad: 2 mm
- Movimiento de avance: 0,1 mm (en línea gris)
- Movimiento de avance: 0,2 mm (en línea azul)

Figura 56. **Señal de corriente en el servomotor del cabezal con velocidad de corte 120 m/min y profundidad de 2 mm**



Fuente: ETXEBERRIA, Juan. *Monitoreo del fresado de moldes*. p. 8.

Fue posible notar que la señal de corriente en el servomotor del cabezal es principalmente sensible a la profundidad del corte y no tanto al movimiento de avance. Lo llamativo fue que esta señal de corriente no varió con la velocidad de corte.

5.4. **Señales internas en el monitoreo de la herramienta de corte o fresa**

Es necesario comprobar la sensibilidad de las señales internas del fresado de moldes, manteniendo constantes los parámetros de corte, ante los distintos estados de la herramienta de corte o fresa.

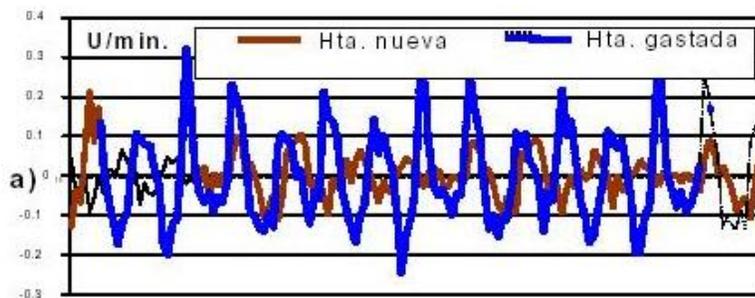
Se debe indicar que, para este trabajo, x es el eje longitudinal, z es el eje horizontal mientras que y es el eje vertical en la máquina-herramienta CNC.

Las señales internas en el monitoreo de la herramienta de corte o fresa en el mecanizado o fresado de moldes son las de velocidad de traslación (en m/min.) de cada uno de los ejes de la fresadora CNC y las de corriente (en amperios) de los servomotores colocados en cada uno de estos ejes. Además, se emplean las siguientes señales internas del cabezal de la fresadora CNC:

- Velocidad instantánea de giro en rpm
- Corriente en el servomotor
- Potencia demandada por el servomotor

Para mostrar la sensibilidad de las señales internas del proceso ante el desgaste de la herramienta de corte o fresa en la figura 57 se muestra una gráfica de la velocidad de avance del eje x o longitudinal, al estar la herramienta de corte nueva (línea café) y desgastada (línea azul).

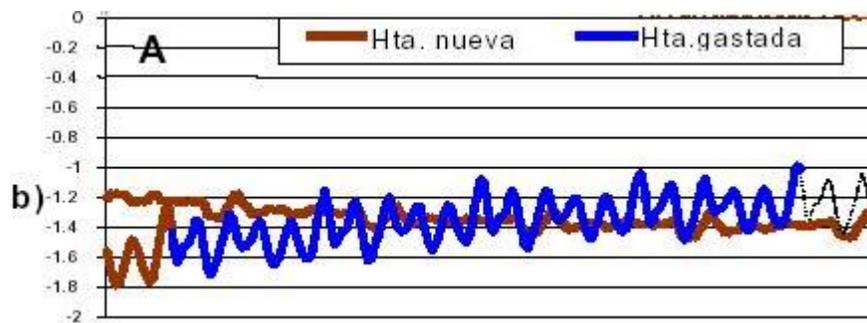
Figura 57. **Velocidad instantánea (U/min.) de avance del eje x o longitudinal de la fresadora CNC ante los estados de la herramienta de corte**



Fuente: ETXEBERRIA, Juan. *Monitoreo del fresado de moldes*. p. 9.

Se muestra en la figura 58 una gráfica de la señal de corriente del servomotor del cabezal de la fresadora CNC, al estar la herramienta de corte nueva (línea café) y desgastada (línea azul).

Figura 58. **Señal de corriente del servomotor del cabezal de la fresadora CNC ante los estados de la herramienta de corte**



Fuente: ETXEBERRIA, Juan. *Monitoreo del fresado de moldes*. p. 9.

5.5. Selección automática de descriptores

Al inicio de este capítulo se indicó que los descriptores tienen la capacidad de discriminar los estados de la herramienta de corte. En sí los descriptores son valores escalares tales como la media, la desviación estándar o la curtosis, obtenidas del procesamiento de señales internas del mecanizado o de fresado de moldes.

Se desarrolló un módulo para la extracción de descriptores, el cual consiste en lo siguiente:

- Adquisición y acondicionamiento de las señales internas del proceso.
- Cálculo y selección de los descriptores.

- Clasificación del desgaste de la herramienta de corte mediante una red neuronal.

En el experimento se hizo necesaria la creación de este módulo debido a lo siguiente:

- Se aplicaron transformaciones a las señales internas, tales como integrales y derivadas, durante el procesamiento de los datos.
- Por cada ensayo se obtuvo una cantidad elevada de señales.
- La cantidad de ensayos realizados.

Los descriptores pueden emplearse, ya sea para clasificar a la herramienta de corte (nueva o desgastada) o para predecir la evolución del desgaste de la misma.

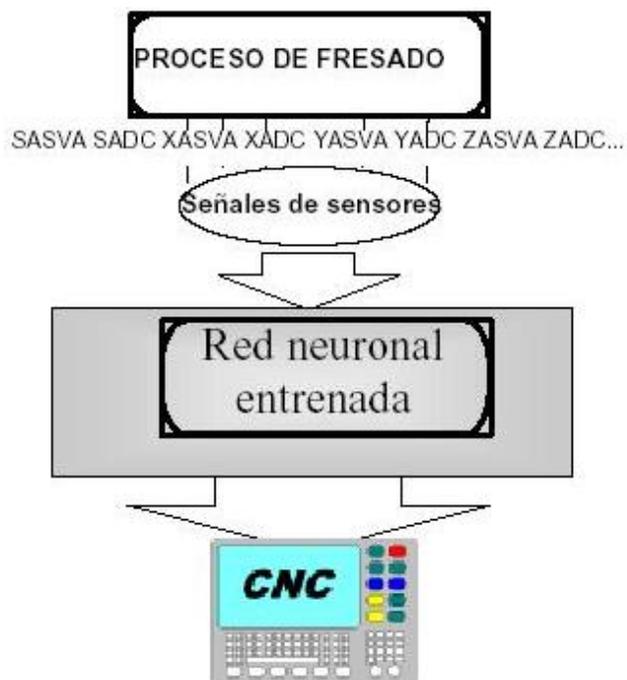
El proceso para completar la clasificación, o predicción del desgaste, de la herramienta de corte o fresa conlleva los pasos siguientes:

- Captación de las señales durante el proceso de mecanizado de moldes.
- Tratamiento y acondicionamiento de las señales.
- Obtención de una lista de descriptores: media, desviación estándar, curtosis, etc.
- Selección y clasificación de descriptores: estos serán la capa de entrada de la red neuronal.
- Creación de la red neuronal: esta será diferente si lo que se pretende es clasificar el estado de la herramienta de corte o predecir su desgaste.
- Aplicación en tiempo real.

Luego de que el proceso ha sido implementado en el hardware y el software a emplearse para la red neuronal, no se necesita obtener alguna otra lista de descriptores ni de crear otra red neuronal más.

En la figura 59 se muestra la arquitectura del proceso para el usuario final. El entrenamiento de la red neuronal se refiere al procesamiento de una parte de los datos de la capa de entrada.

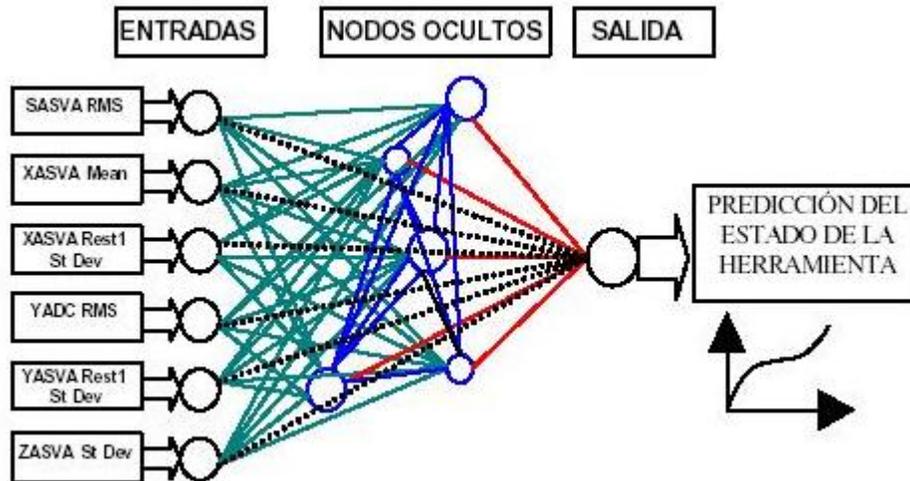
Figura 59. **Arquitectura del proceso para el usuario final**



Fuente: ETXEBERRIA, Juan. *Monitoreo del fresado de moldes*. p. 13.

Se muestra en la figura 60 la arquitectura de la red neuronal resultante en la predicción del desgaste de la herramienta de corte. Esta red neuronal es del tipo 6-5-1, es decir, que consta de 6 entradas, 5 elementos procesados ocultos y 1 salida.

Figura 60. **Arquitectura de la red neuronal resultante en la predicción del desgaste de la herramienta de corte**



Fuente: ETXEBERRIA, Juan. *Monitoreo del fresado de moldes*. p. 15.

El software empleado como herramienta de procesamiento de la red neuronal, en este caso Aspen Neural Sim, tiene 5 bloques principales:

- Definición del tipo de problema: clasificación del estado de la herramienta de corte o predicción del desgaste de la misma.
- Nivel de ruido de los datos de entrada.
- Definición por parte del usuario de la transformación a aplicarse sobre los datos de entrada.
- Definición por parte del usuario de la selección del grupo de descriptores.
- Creación de la red neuronal.

Otra herramienta de procesamiento de redes neuronales es Matlab Neural Networks Toolbox, la cual, sin embargo, requiere de mayor cantidad de ensayos experimentales que Aspen Neural Sim, para poder crear la red neuronal.

El grupo de descriptores seleccionado para identificar el estado de la herramienta de corte o fresa se detalla en la tabla IV.

Tabla IV. **Grupo de descriptores seleccionado para identificar el estado de la herramienta de corte o fresa**

Señal del Sensor Interno	Descriptor	Correlación
Velocidad instantánea del eje longitudinal x	Desviación estándar de la primera derivada	0,678
Velocidad instantánea del eje vertical y	Desviación estándar de la primera derivada	0,772
Corriente del servomotor del eje vertical y	RMS o valor eficaz de la corriente	0,675
Velocidad instantánea del eje horizontal z	Desviación estándar	0,654

Fuente: ETXEBERRIA, Juan. *Monitoreo del fresado de moldes*. p. 16.

La correlación es un coeficiente que mide, qué tan relacionadas están dos variables. En este caso la velocidad instantánea del eje vertical y (variable 1) proporciona mayor información respecto al desgaste de la herramienta de corte o fresa (variable 2), ya que es la que tiene un coeficiente de correlación mayor (0.772).

En la figura 61 se muestra la comparación entre el desgaste real y el predicho, de la herramienta de corte, por la red neuronal para un ensayo con velocidad de corte 80 metros por minuto, movimiento de avance 0.2 milímetros y profundidad de 1 milímetro.

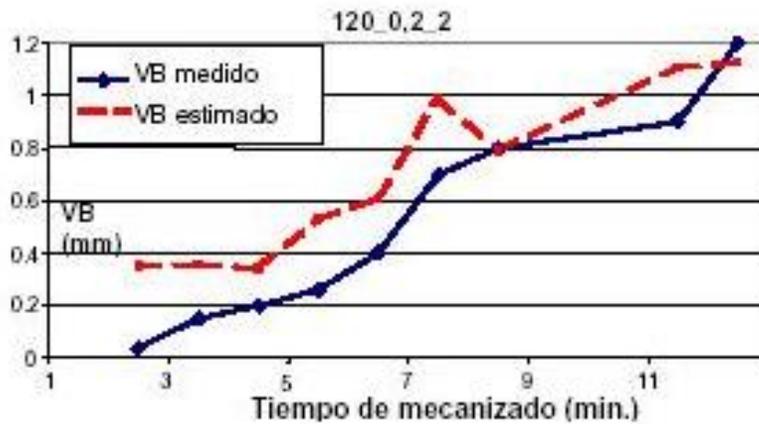
En la figura 62 se muestra la comparación entre el desgaste real y el predicho, de la herramienta de corte, por la red neuronal para un ensayo con velocidad de corte 120 metros por minuto, movimiento de avance 0.2 milímetros y profundidad de 2 milímetros.

Figura 61. **Comparación entre el desgaste real y el predicho por la red neuronal**



Fuente: ETXEBERRIA, Juan. *Monitoreo del fresado de moldes.* p. 17.

Figura 62. **Comparación entre el desgaste real y el predicho por la red neuronal**



Fuente: ETXEBERRIA, Juan. *Monitoreo del fresado de moldes.* p. 17.

6. ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE CONFIABILIDAD PARA HERRAMIENTAS DE CORTE APLICADO AL PROCESO DE TALADRADO

Todas las herramientas de corte se desgastan inevitablemente durante los procesos de maquinado de piezas hasta el final de su vida útil. Debido a ello, el desgaste es una de las causas de falla más importantes en los procesos de maquinado y asimismo es importante conocer su comportamiento, para predecir los posibles efectos sobre las piezas de trabajo.

La técnica de confiabilidad es empleada para evaluar la posibilidad de que un componente sometido a condiciones especiales de uso, opere con éxito durante un período de tiempo predeterminado. Así, la aplicación de esta técnica permite evaluar la posibilidad de que un equipo, proceso o producto, falle.

Mediante la técnica de confiabilidad se puede modelar el desgaste de las herramientas de corte en el mecanizado y así determinar la probabilidad de que alcancen un valor específico de desgaste durante su tiempo de uso.

Con el afán de aplicar los conceptos de confiabilidad en la previsión de la vida útil de una herramienta de corte, se realizó un estudio ¹ de desgaste de brocas helicoidales a partir de ensayos controlados de taladrado, realizados en piezas de acero de bajo contenido de carbono.

1 Este estudio fue realizado por los ingenieros Carmen Patiño, de la Universidad de Antioquía, Colombia, y Gilberto Martha de Souza, de la Universidad de Sao Paolo, Brasil, en 2006. p. 56-69.

En los ensayos se midió el desgaste en las aristas de corte de cada broca, asociándose a este nivel de desgaste una función de distribución de probabilidad; de esta forma se define la probabilidad de que la broca alcance cierto nivel de desgaste después de realizar un número controlado de agujeros.

6.1. Análisis de confiabilidad

Como ya se mencionó, la confiabilidad se define como la probabilidad de que en un período de tiempo predeterminado, un componente, equipo o sistema realice las operaciones para las que fue destinado sin que ocurran fallos.

Para definir la confiabilidad es necesario lo siguiente:

- Definir inicialmente un desempeño específico
- Establecer las condiciones de operación
- Establecer un período de utilización

Para calcular la confiabilidad de cualquier proceso es necesario establecer lo siguiente:

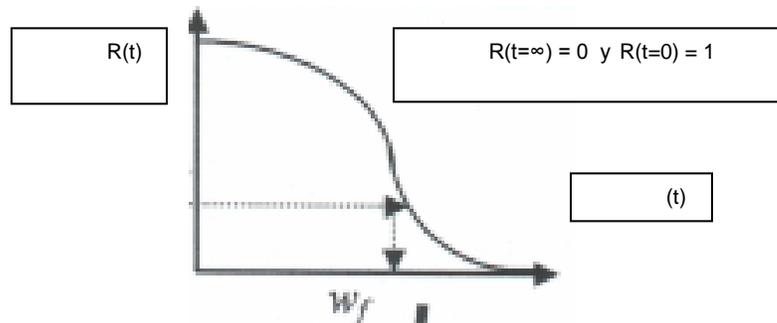
- La función del proceso.
- Situaciones o condiciones que hacen que se pierda la funcionalidad del proceso.
- Consecuencias de cada condición sobre el proceso.

La operación de cualquier proceso se puede definir por dos eventos:

- Operando normalmente
- Operando en estado de falla

Se representa en la figura 63 la curva genérica de la confiabilidad.

Figura 63. **Curva genérica para la confiabilidad**



Fuente: Universidad de Antioquía, Colombia. Revista de la Facultad de Ingeniería No.36. p. 58.

6.1.1. Análisis de confiabilidad por modos y efectos de falla

El análisis de confiabilidad de un proceso se puede realizar mediante tres métodos distintos:

- Diagrama de bloques
- Modos y efectos de falla
- Árbol de fallas

El estudio en el que se basa este capítulo, se emplea el análisis de modos y efectos de falla (FMEA, por sus siglas en inglés), por medio del cual se identifican los puntos vulnerables de un proceso. Es necesario, al utilizar el FMEA, lo siguiente:

- Enumerar los posibles modos de falla: aquí se consideran las características de operación del proceso.

- Definir las consecuencias o efectos que cada uno de los modos de falla tendrá sobre el proceso.

En los casos de procesos de maquinado, el FMEA identifica las fallas que dependen de la manufactura y procura que estas no ocurran; además, el FMEA identifica puntos críticos del proceso y permite verificar las partes del proceso que merecen una atención especial.

Al realizar un FMEA, se debe responder lo siguiente:

- ¿Cuáles son los modos de falla?
- ¿Cuáles son los efectos, de estos modos de falla, sobre el proceso?
- ¿Qué tan críticos son los efectos?
- ¿Cómo detectar las fallas?
- ¿Cuáles son las medidas a tomar para evitar las fallas, o al menos, minimizar sus efectos?

La principal ventaja del FMEA es la documentación de los procesos analizados y la identificación de los modos de falla causados por la interacción con otros procesos o subprocesos.

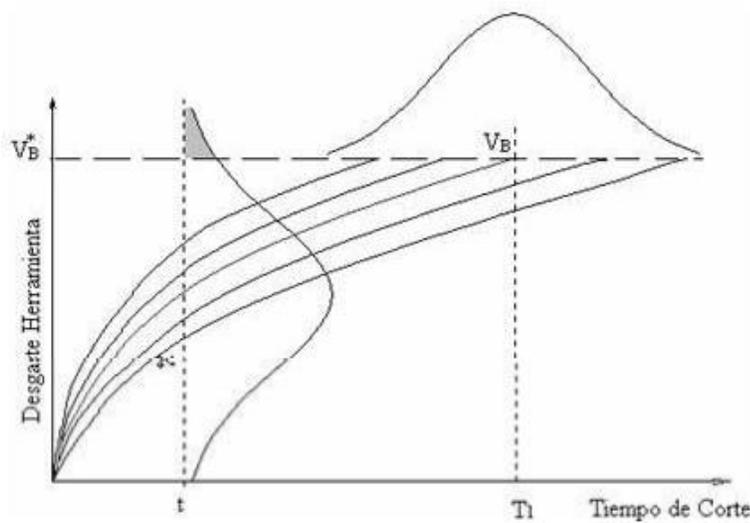
6.1.2. FMEA aplicado al proceso de taladrado

La confiabilidad del proceso de desgaste de una herramienta de corte utilizada en procesos de maquinado, representa la probabilidad de que en un tiempo t el valor de este desgaste alcance un nivel V_B considerado crítico. Como el desgaste en una herramienta de corte es acumulativo, la confiabilidad de esta debe ser representada por una distribución de probabilidad que simule tasas de falla crecientes en función del tiempo.

En el estudio en el que se basa este capítulo, se trabajó con la distribución de probabilidad lognormal.

La relación entre el desgaste de la herramienta de corte y el tiempo de corte se muestra en la figura 64.

Figura 64. **Relación entre el desgaste de la herramienta y el tiempo de corte**



Fuente: Universidad de Antioquía, Colombia. Revista de la Facultad de Ingeniería No.36. p. 60.

Se puede expresar la confiabilidad de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$R(t) = P(T > t) \quad R(t) = 1 - f(t)$$

$R(t)$ es la confiabilidad del componente y $f(t)$ es la probabilidad de que este falle. La confiabilidad siempre decrece, entonces cuánto mayor sea el periodo de operación mayor será la probabilidad de que el proceso falle.

6.2. Análisis experimental de desgaste para herramientas de corte aplicado al proceso de taladrado

En la primera etapa del análisis de confiabilidad es necesario determinar cuáles son las variables relevantes que definen la función del proceso y la importancia de esas variables en la cadena productiva. Además, en el caso del taladrado, las fallas del proceso que pueden causar agujeros fuera de las especificaciones establecidas de antemano.

Simultáneamente, este análisis permite verificar la importancia del desgaste de la herramienta de corte dentro de las fallas del proceso.

6.2.1. Diagrama Causa-Efecto para el proceso de taladrado

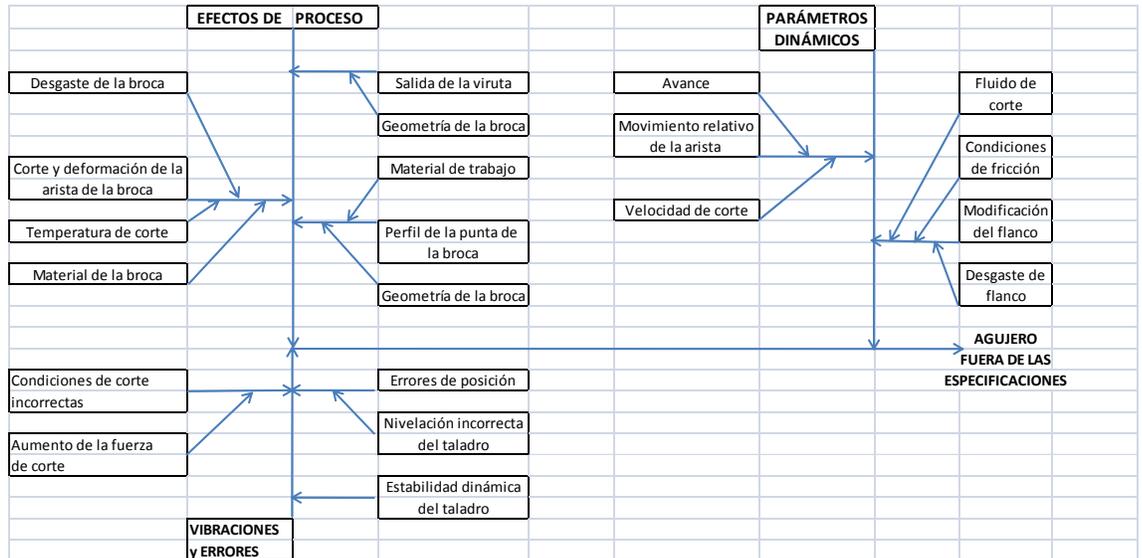
El Diagrama Causa-Efecto del proceso de taladrado muestra la relación existente entre la obtención de agujeros fuera de las especificaciones establecidas de antemano y los parámetros importantes del proceso y de la operación.

Los parámetros del proceso están representados por los siguientes factores:

- Efectos del proceso
- Parámetros dinámicos
- Vibraciones y errores de operación

En la figura 65 se muestra el Diagrama Causa-Efecto del proceso de taladrado.

Figura 65. Diagrama Causa-Efecto para el proceso de taladrado



Fuente: Universidad de Antioquía, Colombia. Revista de la Facultad de Ingeniería No.36. p. 61.

Se puede observar en este Diagrama que el desgaste de la broca está involucrado en la mayoría de las causas de fallas. El agujero fuera de las especificaciones puede producirse por errores en las dimensiones (causados por el desgaste de la broca, la formación de viruta y la vibración del taladro), en la localización y en lo cilíndrico del agujero.

6.3. Desgastes de flanco y de cráter en las brocas

La broca presenta modos de falla complejos, lo que la convierte en el elemento más relevante al evitar agujeros fuera de las especificaciones.

Debido a lo anterior, este estudio se enfoca en la confiabilidad, determinando la distribución de probabilidad del desgaste de flanco (V_B) de la broca.

El V_B de la broca se presenta donde la velocidad de corte es mayor y el desgaste de cráter (K_B) se observa sobre la superficie de salida de la viruta. Se observa esto en la figura 66.

Figura 66. **Desgaste de flanco y de cráter en brocas**



Fuente: Universidad de Antioquía, Colombia. Revista de la Facultad de Ingeniería No.36. p. 62.

La variación del V_B es alta y es por ello que existen límites superiores, los cuales dependen de la zona donde se esté midiendo.

Los valores recomendados por los fabricantes de brocas varían entre 0,12 milímetros y 0,3 milímetros y están en función del diámetro de la broca y del material utilizado.

Es importante analizar separadamente el desgaste de la broca debido a la relación existente entre este desgaste y los errores dimensionales y la rugosidad del agujero; este análisis, empleando el FMEA, se muestra en la tabla V.

Tabla V. **Análisis de modos y efectos de las fallas para el desgaste de la broca**

Funciones	Modo de Falla	Causas	Efectos
Obtener agujeros cilíndricos de diámetro φ y profundidad h, de acuerdo con los requisitos de diseño	Desgaste excesivo de la broca	<p>Velocidad de corte distinta a la especificada por el fabricante.</p> <p>Movimiento de avance superior al indicado en la hoja de procesos.</p> <p>Fundición de la viruta y adhesión en la broca.</p> <p>Salida deficiente de la viruta durante el taladrado.</p> <p>Falta de lubricación, dirección incorrecta del flujo de lubricante (debe dirigirse hacia la punta de la broca) o uso de lubricante no apropiado.</p>	<p>Diámetro o altura fuera de las tolerancias geométricas y dimensionales exigidas.</p> <p>Rugosidad superficial superior al valor especificado.</p>

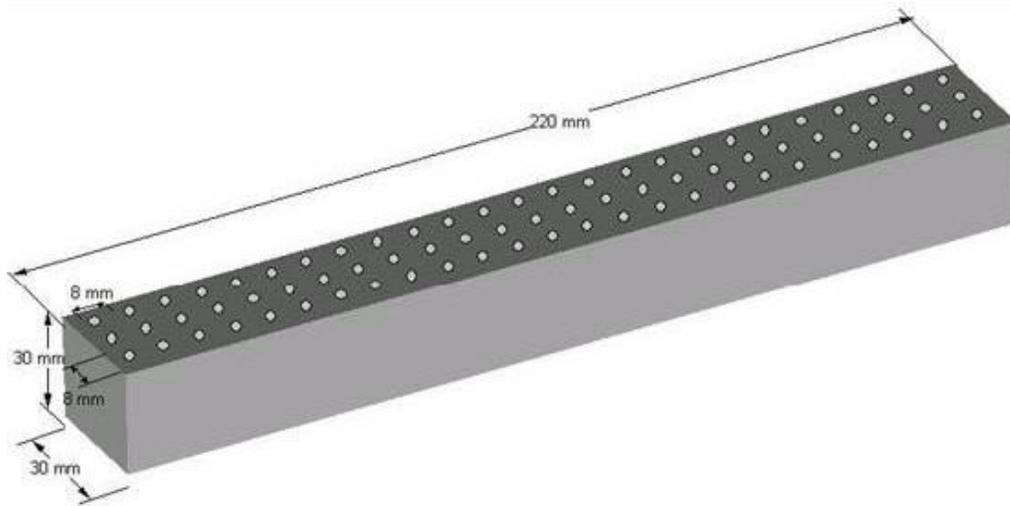
Fuente: Universidad de Antioquía, Colombia. Revista de la Facultad de Ingeniería No.36. p. 63.

En el estudio se mide el desgaste de flanco en el extremo del filo cortante de la broca (ver figura 66), donde se espera que la magnitud del desgaste sea mayor, ya que la velocidad de corte es mayor en esta zona.

6.4. Arreglo experimental

Se empleó, para determinar la distribución de probabilidad, una broca de acero rápido M2. Los ensayos de taladrado se realizaron sobre cuerpos de acero AISI 1016; las medidas de estos cuerpos se muestran en la figura 67.

Figura 67. **Cuerpo de prueba de acero**



Fuente: Universidad de Antioquía, Colombia. Revista de la Facultad de Ingeniería No.36. p. 63.

Para determinar V_B se realizó un análisis de la superficie de la broca utilizando una lupa estereoscópica de alta calidad con una cámara digital incorporada, de resolución 250x.

Se ensayaron 10 brocas de 5 milímetros de diámetro, asignando un cuerpo de prueba a cada una. Inicialmente se hicieron 20 agujeros, para que existiese cierto nivel de desgaste en la broca; luego se hicieron secuencias de 5 agujeros hasta completar en total 45, o hasta que la broca fallase. En la tabla VI se muestran las condiciones de operación.

Tabla VI. **Condiciones de operación del ensayo de taladrado efectuado en el estudio**

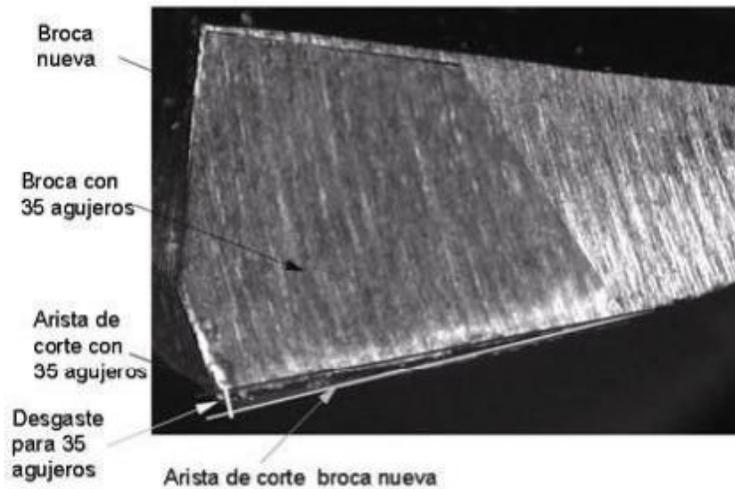
Diámetro de la broca	5 mm
Profundidad del agujero	25 mm
Movimiento de avance	0,025 mm/rev.
Rotación	4 000 rpm
Velocidad de corte	62,83 mm/min
Lubricación	No hubo

Fuente: Universidad de Antioquía, Colombia. Revista de la Facultad de Ingeniería No.36. p. 64.

Se tomaron fotografías antes de empezar los ensayos y al terminar cada una de las secuencias de 5 agujeros, obteniendo así información sobre el desgaste de flanco, para cada broca, después de la realización de 0, 20, 25, 30, 35, 40 y 45 agujeros.

Las mediciones de desgaste son hechas estableciendo y midiendo la diferencia existente entre la posición de la arista de corte de la broca nueva y la posición de esta arista después que la broca ha realizado cierto número de agujeros; esto se hace sobreponiendo las imágenes de la broca estando nueva y estando desgastada, tal y como se muestra en la figura 68.

Figura 68. **Procedimiento para establecer el desgaste de flanco en una broca determinada, después de 35 agujeros**



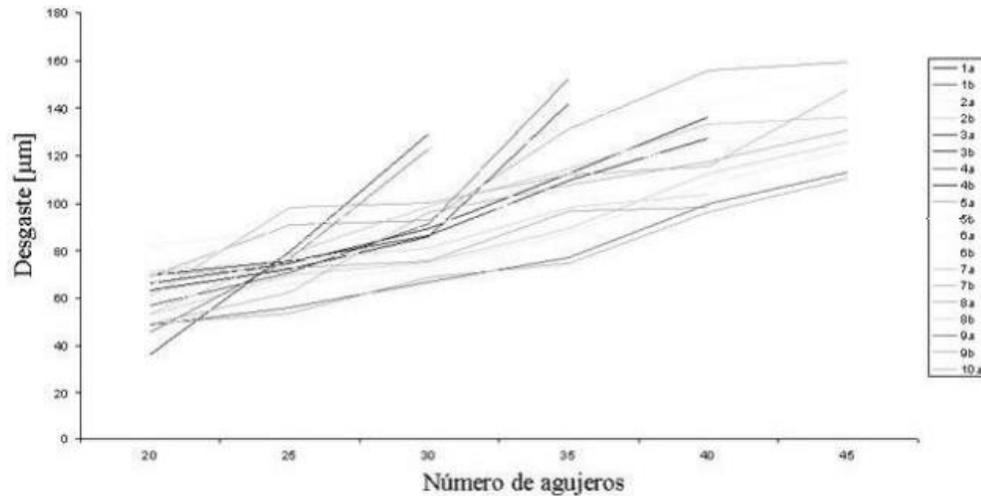
Fuente: Universidad de Antioquía, Colombia. Revista de la Facultad de Ingeniería No.36. p. 64.

El procedimiento mencionado arriba se siguió para cada una de las dos aristas de corte de las 10 brocas utilizadas durante el estudio. Así, después de realizar cierto número de agujeros, se tienen 20 valores de magnitud de desgaste de flanco, los cuales son suficientes para caracterizar la función de densidad de probabilidad asociada al nivel de desgaste de la broca. Las brocas se numeraron del 1 al 10.

No todas las brocas concluyeron el ensayo, debido a que algunas fallaron antes de realizar los 45 agujeros; en especial, con la broca número 4 solo se realizaron 30 agujeros, siendo esto muestra fehaciente de la variabilidad en el desgaste de las brocas.

En la figura 69 se muestran los datos del ensayo en forma gráfica.

Figura 69. **Evolución del desgaste de flanco para las 10 brocas, en función del número de agujeros**



Fuente: Universidad de Antioquía, Colombia. Revista de la Facultad de Ingeniería No.36. p. 64.

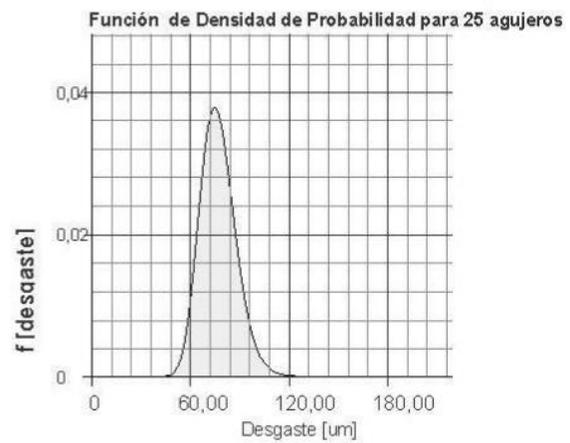
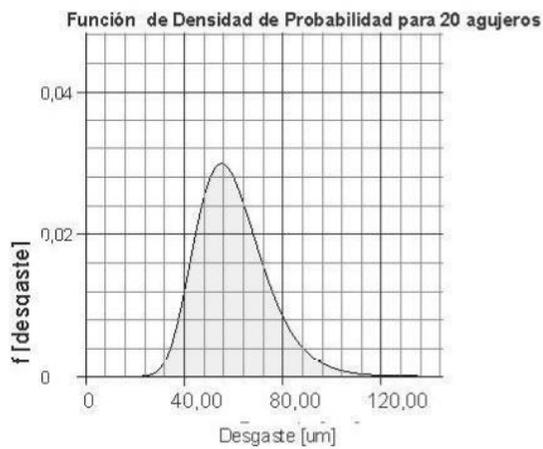
El desgaste en la broca es creciente, en función del número de agujeros realizados; la tasa de crecimiento del desgaste no es constante. En la figura 69 se puede observar que entre 40 y 45 agujeros la tasa de desgaste se eleva notoriamente, lo que indica que el instante de falla de la broca está próximo.

6.5. Función de densidad de probabilidad del ensayo

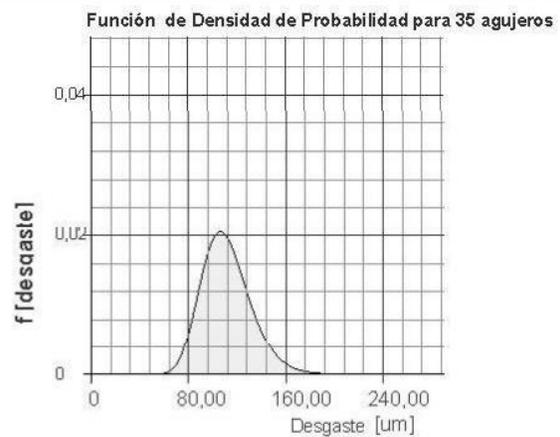
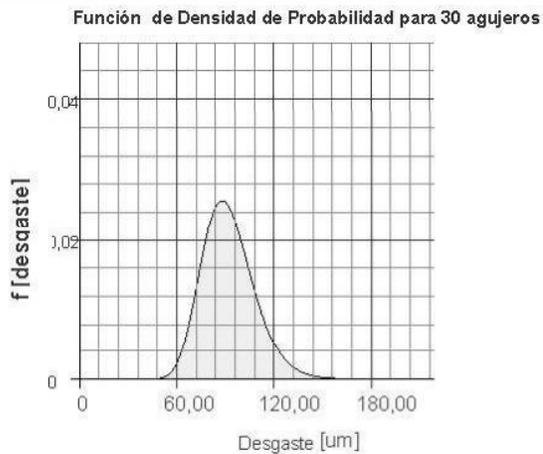
Los valores de desgaste, para un determinado número de agujeros, determinan la función de densidad de probabilidad, la cual expresa la variación probabilística del desgaste de flanco (V_B) de la broca. En la figura 70 se muestran las funciones de densidad de probabilidad para la magnitud del desgaste en función del número de agujeros realizados.

Figura 70. **Funciones de densidad de probabilidad en función del número de agujeros realizados: a) 20 y 25; b) 30 y 35; c) 40 y 45.**

a)

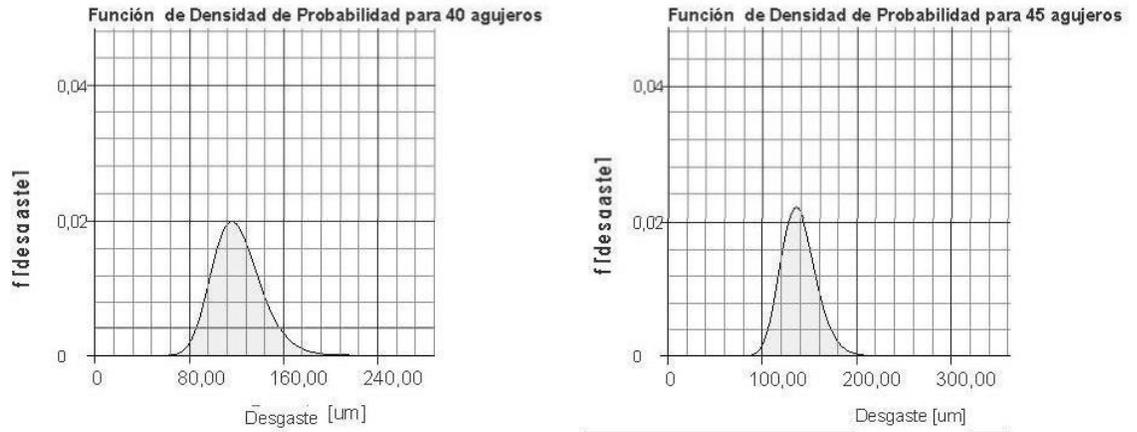


b)



Continuación de la figura 70.

c)



Fuente: Universidad de Antioquía, Colombia. Revista de la Facultad de Ingeniería No.36. p. 66.

El tiempo de ejecución de un agujero fue 15 segundos, siendo este el valor utilizado en la transformación de número de agujeros realizados para el tiempo de trabajo de la broca.

La variación del desgaste en función del tiempo de operación de la broca puede ser utilizada como referencia para definir el tiempo de vida de la broca, considerando un desgaste admisible; este desgaste se define basándose en lo siguiente:

- Efecto sobre el acabado superficial.
- Efecto sobre las tolerancias dimensionales y geométricas del agujero.

Al fijar el desgaste admisible en 120 micrómetros, se obtiene la probabilidad de que las brocas alcancen este valor en cada secuencia de agujeros; esto se muestra en la tabla VII.

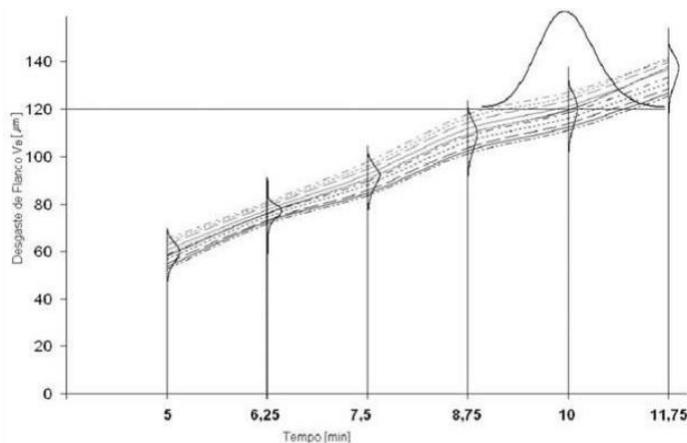
Tabla VII. **Valores de confiabilidad de la broca cuando el desgaste de flanco es de 120 μm**

Número de agujeros	P ($V_B < 120$)
20	0,001084
25	0,000539
30	0,053967
35	0,307287
40	0,490106
45	0,849090

Fuente: Universidad de Antioquía, Colombia. Revista de la Facultad de Ingeniería No.36. p. 67.

En la figura 71 se muestra la función de densidad de probabilidad asociada al tiempo de operación de las brocas hasta que el V_B admisible de 120 micrómetros se alcance.

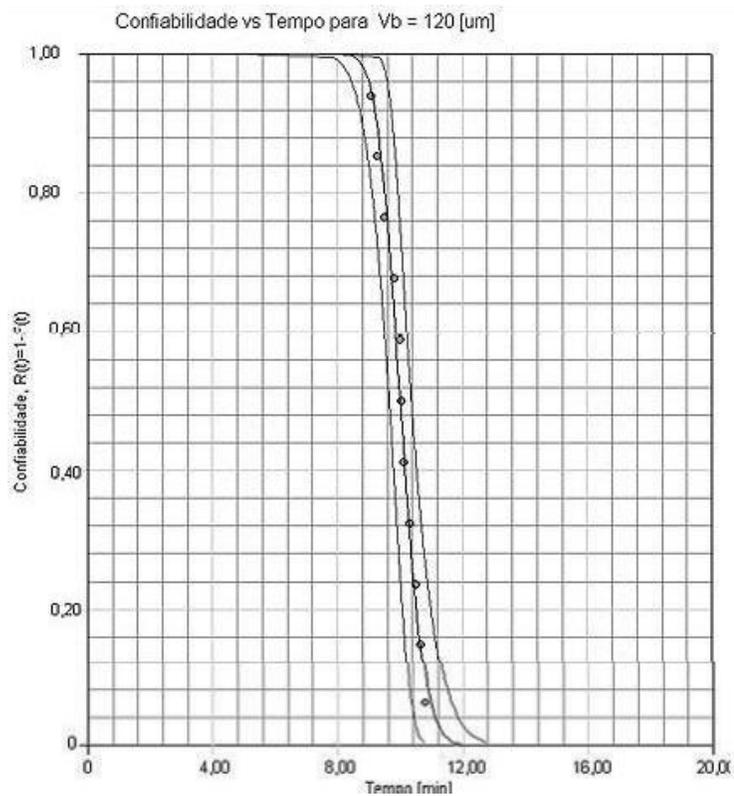
Figura 71. **Función de densidad de probabilidad en función del tiempo al alcanzar el V_B admisible**



Fuente: Universidad de Antioquía, Colombia. Revista de la Facultad de Ingeniería No.36. p. 67.

Se puede observar en la figura 72 que cuando el tiempo de taladrado sobrepasa los 8,40 minutos, la confiabilidad de la broca disminuye rápidamente. En el estudio, este es el tiempo medio indicado para la sustitución de la broca, para evitar que esta opere con un desgaste de flaco V_B mayor a la magnitud fijada, ya que esto afectaría la calidad del agujero. Con la función de densidad de probabilidad se puede obtener la confiabilidad en función del tiempo de taladrado; esto se muestra en la figura 72.

Figura 72. **Confiabilidad de la broca en función del tiempo de taladrado**



Fuente: Universidad de Antioquía, Colombia. Revista de la Facultad de Ingeniería No.36. p. 68.

6.6. Situación en Guatemala

El taladro de columna es la segunda máquina-herramienta más común en talleres de metal-mecánica en Guatemala, detrás del torno.

La principal causa que provoca que un agujero en el taladrado no resulte a la medida deseada es el malafilamiento de la broca; otras causas son los malos ajustes del cabezal y/o el mandril del taladro y una mala sujeción de la pieza de trabajo sobre la mesa del taladro. Estas causas se incluyen en el diagrama de la figura 65.

El principal efecto sobre la pieza de trabajo al fallar una broca es el diámetro errado del agujero perforado; otro efecto importante es la malformación interna del agujero.

En Guatemala, no hay cuidados y/o verificaciones en el montaje de las máquinas-herramientas en la mayoría de talleres; por ello es común que la vibración del taladro provoque que el agujero sobre la pieza de trabajo no resulte a la medida o en una localización incorrecta (ver el diagrama de la figura 65).

No existen métodos para detectar fallas en la broca durante el taladrado; solo se verifican las medidas de la broca con un vernier o con un micrómetro. En algunos talleres, al taladrar piezas hechas de dos o más materiales de distinta dureza, se marcan los puntos a taladrar y la broca tiende a correrse al lado del material menos duro; esta práctica se realiza por prevención.

Para minimizar los efectos de las fallas en el taladrado, lo común en el país es simplemente ajustar la pieza de trabajo en la mesa del taladro.

Se aplican líquidos como el aceite común, el aceite soluble o el emulsionante (tal como el Shell Dromus B), los cuales funcionan como lubricantes y refrigerantes a la vez, para disminuir el desgaste de la broca.

7. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LAS HERRAMIENTAS DE CORTE EN EL PROCESO DE CILINDRADO, EMPLEANDO NÚMEROS ADIMENSIONALES

La importancia de los procesos de remoción de material en la actualidad se puede visualizar al tener en cuenta los costos de esta actividad.

En Estados Unidos, por ejemplo, se estima que los costos asociados a los procesos de remoción de material equivalen a alrededor del 10 por ciento del PIB ².

Debido a ello, el conocimiento de las condiciones de los procesos de corte y su relación con las variables que inciden en el desempeño de la herramienta de corte es un tema de permanente investigación.

La selección adecuada de la herramienta de corte depende de los siguientes factores:

- Tipo de operación de corte
- Máquina-herramienta a emplear
- Material de la pieza de trabajo
- Necesidades de producción
- Costo
- Acabado superficial deseado

2. SHAW, M.C. Principios del mecanizado de metales. (Estados Unidos: Oxford University Press, 2005). p. 2.

En el estudio en el que se basa este capítulo ³, se emplea la técnica del análisis dimensional para analizar el desgaste en herramientas de corte. El teorema de Buckingham es el apropiado debido a la cantidad de variables (7) involucradas en el estudio. La operación básica de cilindrado es adecuada para estudiar los parámetros adimensionales del mecanizado de piezas.

7.1. Análisis dimensional

Los parámetros adimensionales se emplean usualmente en la mecánica de fluidos, ya que facilitan la comprensión y el análisis de los fenómenos asociados al flujo de fluidos.

Sin embargo, estos parámetros se pueden emplear en otras ramas de la ingeniería, ya que permiten utilizar los resultados experimentales, obtenidos en condiciones limitadas, en situaciones en las cuales se dispongan propiedades físicas y dimensiones geométricas diferentes a las obtenidas experimentalmente.

Un ejemplo de parámetro adimensional es la relación de los diámetros de los pistones en un gato hidráulico; esta relación, la cual determina la ventaja mecánica del aparato, es adimensional e independiente del tamaño total de los pistones.

El análisis dimensional se basa en el concepto de homogeneidad dimensional, por medio del cual se asegura que todos los términos de una ecuación tengan las mismas dimensionales.

3. Fuente: BALLESTAS, Humberto, LLANO SÁNCHEZ, Luis y GÓMEZ RIVERA, William. Ciencia e ingeniería de Nueva Granada, Colombia. p. 113-127.

Mediante el análisis dimensional el problema o fenómeno físico se representa por una función de los denominados grupos adimensionales, en vez de representarse por las variables que intervienen. Así se reduce el número de variables y se facilita el análisis del problema.

7.2. Análisis dimensional aplicado al mecanizado de metales

Hay muchas variables involucradas en el proceso de corte o mecanizado de metales. En el estudio en el cual se basa este capítulo, se seleccionaron las variables que inciden en el desgaste de la herramienta de corte y que pueden dar alguna información acerca del mal uso que se le diera a la misma en el proceso de torneado.

El criterio utilizado en la determinación de la vida de la herramienta de corte fue el de dimensiones preestablecidas en la franja de desgaste de flanco V_B ⁴. Otras variables como la temperatura y la fuerza de corte no se tomaron en cuenta debido a las limitaciones existentes para calcularlas en un taller de metal-mecánica.

En un estudio previo⁵, se obtuvieron los parámetros adimensionales del mecanizado de metales. La variable dependiente es el desgaste de flanco incremental máximo V_B ; las variables independientes son:

- Longitud torneada o mecanizada L
- Velocidad de corte v
- Tiempo de pasada o de mecanizado t
- Velocidad de avance f , en mm/min
- Profundidad de corte d_c

4. Ver el punto 1.4. 5. Fue llevado a cabo en la Universidad de los Andes, Colombia.

- Dureza de la herramienta de corte H_t
- Dureza del material de la pieza de trabajo H_w

En el estudio se pudo demostrar lo siguiente:

$$\pi_1 = \{(v^2 * t) / (f * d_c)\} * (H_t / H_w)$$

$$\pi_2 = V_B / L$$

La velocidad de avance f en mm/min se define como la velocidad instantánea del movimiento de avance en relación con la pieza de trabajo.

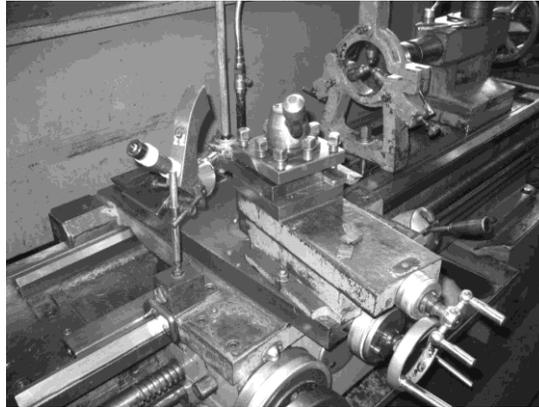
π_1 es el término que introduce la variable de entrada como función de las condiciones de corte, la dureza del material de la pieza de trabajo y la dureza del material de la herramienta de corte. π_2 es la variable de salida.

Se debe señalar que tanto la variable de entrada como la de salida son de fácil medición en cualquier taller de metal-mecánica; en Guatemala, sin embargo, el concepto de desgaste de flanco es relativamente poco conocido y menos aún, aplicado y cuantificado.

7.3. Arreglo experimental

En el arreglo experimental se utilizaron tornos convencionales de fabricación inglesa y polaca. Para medir el desgaste de flanco se diseñó y construyó un montaje portátil para microscopio, el cual consistió en un objetivo de 10X y un ocular de 10X, logrando aumentos de 100X. En la figura 73 se muestra el montaje del microscopio portátil sobre el torno.

Figura 73. **Montaje del microscopio portátil sobre el torno**



Fuente: <http://www.umng.edu.co/documents/63968/74788/17n1art09.pdf>. Consulta: 3 de octubre de 2012.

Se muestra en la figura 74 en detalle el montaje utilizado para la medición del desgaste de flanco V_B . Las fotografías del desgaste se tomaron con una cámara digital y se empleó también un software de medición diseñado por el Programa de ingeniería mecánica de la Universidad de Valencia, España.

Figura 74. **Medición del desgaste de flanco en la herramienta de corte de carburo de tungsteno**



Fuente: <http://www.umng.edu.co/documents/63968/74788/17n1art09.pdf>. Consulta: 3 de octubre de 2012.

Se evaluaron cuatro tipos de herramientas de corte:

- Buril de acero rápido HSS.
- Pastilla de acero rápido sinterizado S-HSS (no disponible en el mercado centroamericano).
- Pastilla de carburo de tungsteno WC.
- Widia: material empleado en Guatemala para realizar incrustaciones en buriles HSS-w, para seguir utilizándolos cuando estos buriles ya se han desgastado.

Los materiales de las piezas de trabajo fueron:

- Acero de bajo contenido de carbono 1020: empleado en aplicaciones estructurales, su límite de fluencia es 331,5 Mpa.
- Acero de contenido medio de carbono 1040: aplicado en la fabricación de cigüeñales, su límite de fluencia es 413,8 Mpa.
- Acero aleado 4140: empleado en ejes y partes estructurales de aviones, su límite de fluencia es 690 Mpa.
- Bronce latón

En la tabla VIII se muestran algunas de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales de las piezas de trabajo empleados en el estudio. En esta tabla BHN es la escala de dureza de Brinell.

Tabla VIII. **Propiedades físicas y mecánicas de los materiales de las piezas de trabajo**

Material Mecanizado	Densidad (Kg / m³)	Dureza (BHN)
Acero 1020	7860	143
Acero 1040	7860	201
Acero 4140	7860	280
Bronce-latón	8970	60

Fuente: <http://www.umng.edu.co/documents/63968/74788/17n1art09.pdf>. Consulta: 6 de octubre de 2012.

7.3.1. Metodología del experimento

La metodología que se empleó en el experimento fue evaluar todas las herramientas de corte con cada uno de los cuatro metales, excepto la herramienta de metal duro widia, con la cual solo se efectuaron ensayos con los aceros 1020 y 1040, en condiciones controladas.

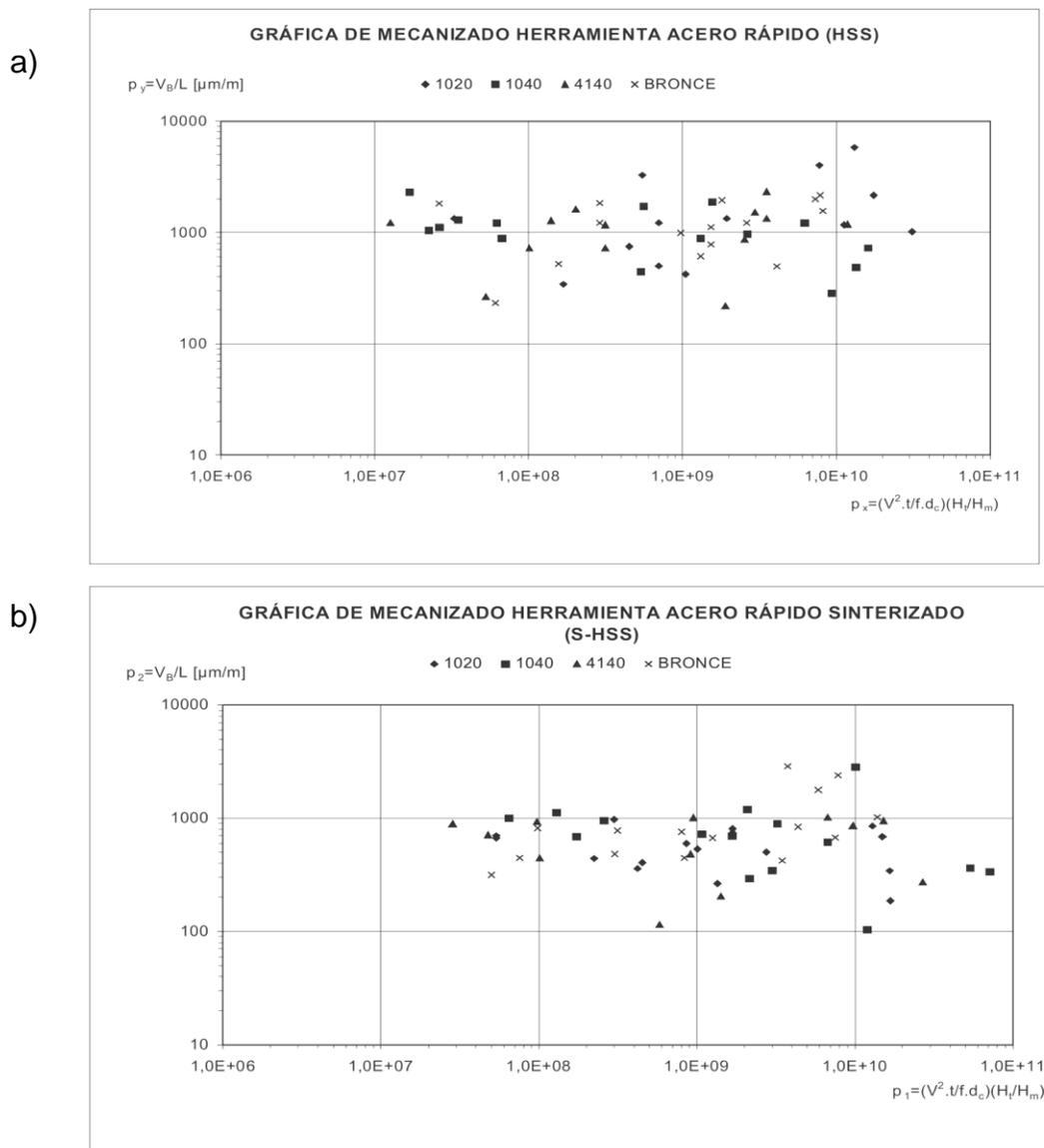
Se variaron las velocidades de corte, velocidades de avance y longitudes mecanizadas, para medir después el desgaste de flanco máximo en la herramienta de corte.

7.4. Análisis de resultados

Las pruebas se realizaron en rangos de baja y media velocidad. En la figura 75 se muestran las gráficas logarítmicas de los números adimensionales que se calcularon para cada una de las herramientas de corte empleadas en el estudio, de la siguiente forma:

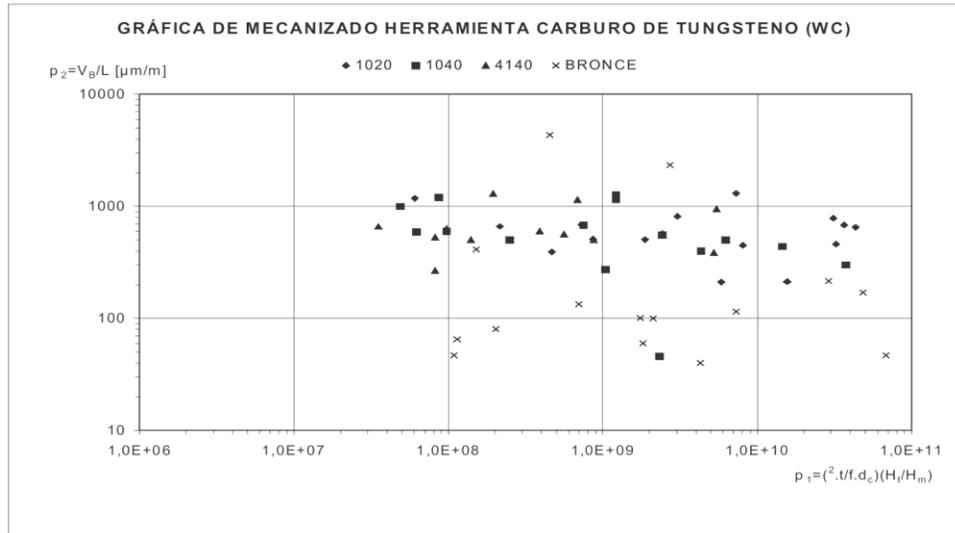
- a) HSS
- b) S-HSS
- c) Carburo de tungsteno WC
- d) WIDIA

Figura 75. **Gráficas logarítmicas π_2 vs π_1 para cada tipo de herramienta de corte empleada en el estudio**

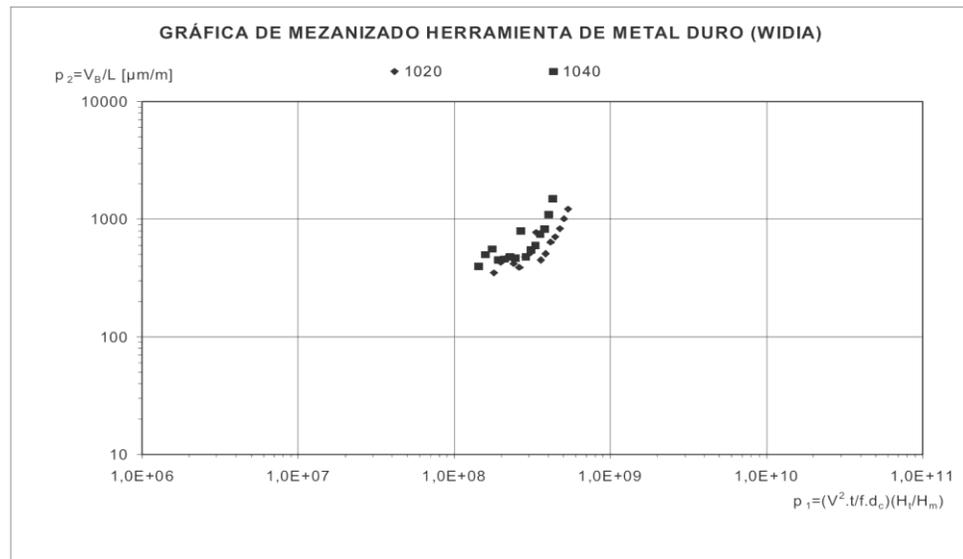


Continuación de la figura 75.

c)



d)



Fuente: <http://www.umng.edu.co/documents/63968/74788/17n1art09.pdf>. Consulta: 7 de octubre de 2012.

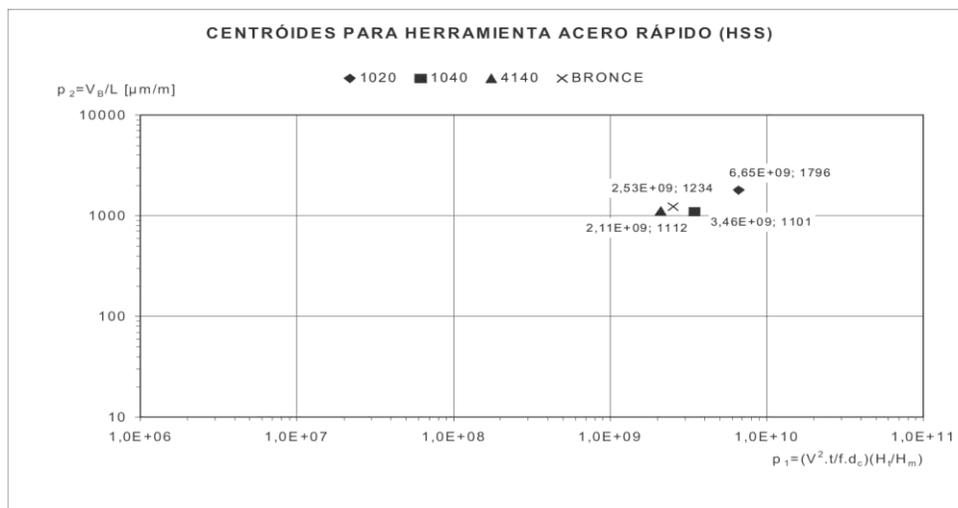
Las herramientas de corte se comportaron de manera tal, que a medida que aumentaba el número de ensayos había mayor aglomeración de puntos alrededor de una zona geométrica particular en cada una de las gráficas de la figura 75; la convergencia ocurre cerca del centro geométrico (π_1 , π_2) de cada gráfica.

Se visualiza también en las gráficas que números adimensionales bajos serían adecuados para ciertas condiciones de corte, ya que muestran poco desgaste en la herramienta de corte por unidad de longitud mecanizada.

Se calcularon los centros geométricos de cada material mecanizado, en cada una de las gráficas de la figura 75; esto se muestra en la figura 76.

Figura 76. **Centroides para: a) HSS; b) S-HSS; c) WC; d) WIDIA**

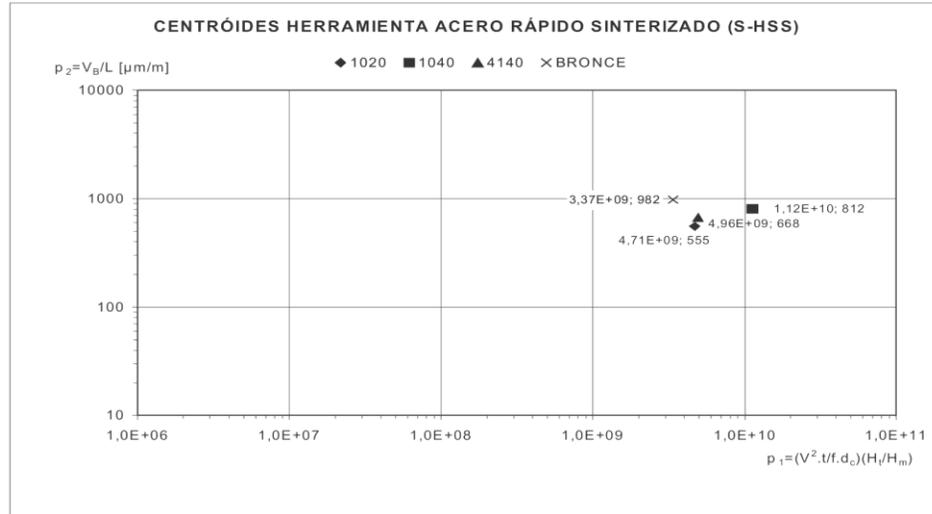
a)



Centroides: acero 1020 en (6.65 E+09, 1796); acero 1040 en (3.46 E+09, 1011); acero 4140 en (2.11 E+09, 1112) y bronce-latón en (2.53 E+09, 1234).

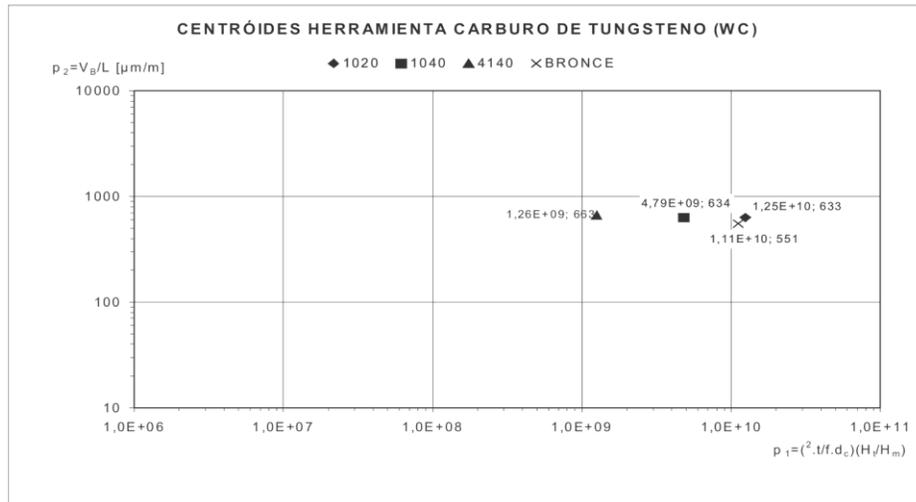
Continuación de la figura 76.

b)



Centroides: acero 1020 en (4.71 E+09, 555); acero 1040 en (1.12 E+10, 812); acero 4140 en (4.96 E+09, 668) y bronce-latón (2.53 E+09, 982).

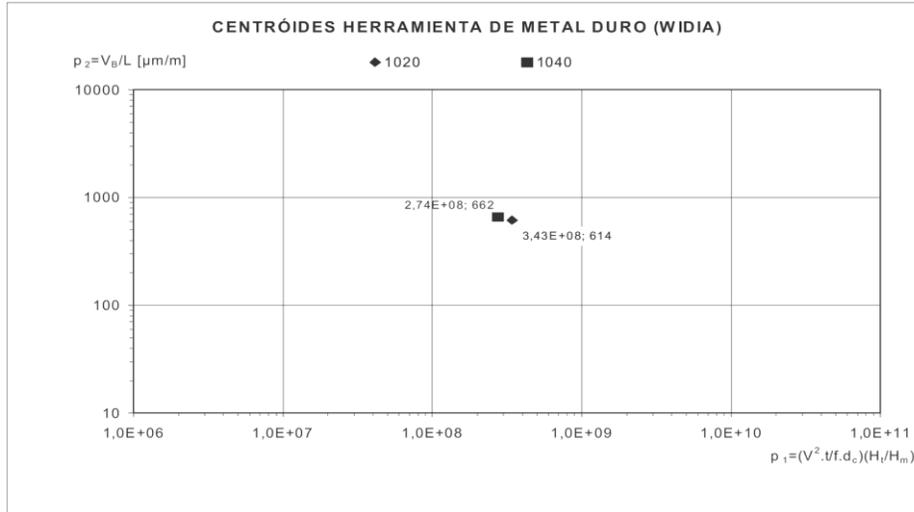
c)



Centroides: acero 1020 en (1.25 E+10, 633); acero 1040 en (4.79 E+09, 634); acero 4140 en (1.26 E+09, 663) y bronce-latón en (1.11 E+10, 551).

Continuación de la figura 76.

d)



Centroides: acero 1020 en (3.43 E+08, 614) y acero 1040 en (2.74 E +08, 662).

Fuente: <http://www.umng.edu.co/documents/63968/74788/17n1art09.pdf>. Consulta: 7 de octubre de 2012.

Los centroides mostrados en la figura 76 se calcularon para una mejor interpretación de los resultados.

Las gráficas de mecanizado muestran los desgastes que tiene cada herramienta de corte con las combinaciones de materiales. Los centroides se calcularon de manera similar, a como se obtiene el centro de masa en una distribución discreta de masas puntuales, es decir:

$$X = \{ \sum m_i * x_i \} / \sum m_i \qquad Y = \{ \sum m_i * y_i \} / \sum m_i$$

En el caso de las gráficas de mecanizado, el cálculo del centro geométrico se lleva a cabo con las ecuaciones siguientes:

$$\pi_{1*} = \sum \pi_{1i} / \sum n_i \qquad \pi_{2*} = \sum \pi_{2i} / \sum n_i$$

El centroide muestra la tendencia de cada combinación material-herramienta de corte hacia un punto, el cual puede variar ligeramente de acuerdo al número de ensayos realizados.

Para comparar herramientas de corte con diferentes materiales es necesario hacer ensayos en condiciones de corte similares que permitan obtener conclusiones de los gráficos del mecanizado.

Se debe señalar que, por la variedad de condiciones de corte en los ensayos con HSS, S-HSS y WC, es posible que las gráficas no muestren resultados definitivos que faciliten la comparación de herramientas de corte.

En la gráfica del mecanizado con herramienta de corte de material widia, por las condiciones controladas en que se llevaron a cabo los ensayos, es posible obtener conclusiones más confiables.

A pesar del número relativamente corto de ensayos realizados, se observa que cada herramienta de corte tiende hacia un centro geométrico en particular.

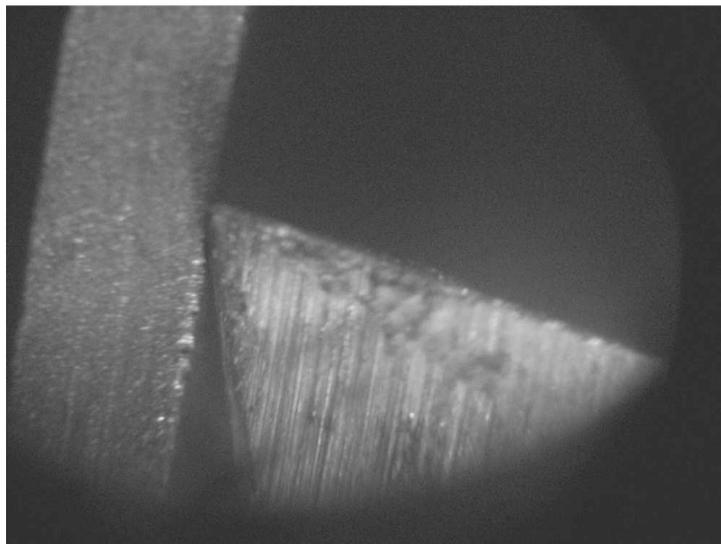
A partir de las gráficas de mecanizado y en condiciones de corte estándar, el análisis dimensional aplicado al mecanizado permite:

- Seleccionar la mejor entre dos o más herramientas de corte

- Elegir las óptimas condiciones de corte
- Predecir la duración del filo de la herramienta de corte

En la figura 77 se muestran, de acuerdo a las gráficas de la figura 76, las zonas de mayor rendimiento de las herramientas de corte y las zonas de uso inadecuado de las mismas; el significado físico de los números adimensionales π_1 y π_2 posibilita hacer esta diferenciación. En la figura 77 se muestra también, la estrategia de medición del desgaste de flanco; la galga que aparece al lado de la herramienta de corte es la longitud de referencia.

Figura 77. **Esquema ilustrativo del uso apropiado e inadecuado de las herramientas de corte**



Fuente: <http://www.umng.edu.co/documents/63968/74788/17n1art09.pdf>. Consulta: 10 de octubre de 2012.

En la variable de entrada π_1 no hay convergencia hacia un valor, debido al amplio rango de velocidades de corte y de avance aplicado y a las relaciones de dureza entre las herramientas de corte y los materiales de trabajo.

Al comparar las gráficas de la figura 75 se nota claramente que las herramientas de corte que se desgastan más en las condiciones evaluadas, según el orden siguiente, son:

- HSS
- S-HSS
- WIDIA
- WC

7.5. Situación en Guatemala

El torno es la máquina-herramienta más común en el país. Los principales criterios al elegir entre dos o más buriles al torneear son:

- El material de la pieza de trabajo
- Tipo de proceso: refrentado, cilindrado, desbaste, etc.

En el punto 7.2, se enumeraron las variables independientes que, a su vez, forman los números adimensionales π_1 y π_2 . En los talleres de metal-mecánica de Guatemala, la velocidad de corte es el principal criterio al establecerse las adecuadas condiciones de corte en el torneado.

Lo anterior implica que, para una posible aplicación del estudio analizado en este capítulo, se deben tomar en cuenta las restantes variables

independientes (mencionadas en el punto 7.2.), estas son de fácil determinación en cualquier taller de metal-mecánica.

Las variables independientes en el proceso de torneado pueden ajustarse de acuerdo a lo siguiente:

- Volumen de corte
- Material y tamaño de la pieza a mecanizar

No hay manera directa de predecir el desgaste de los buriles en un taller de metal-mecánica; sin embargo, algunos cuidados a tener en cuenta son:

- Elección de la calidad del buril.
- Observación de la viruta: dependiendo de la forma de la viruta se puede determinar si el buril se está desgastando o está operando adecuadamente.

Una dificultad para aplicar el presente estudio analizado radica en el hecho de que no hay controles en los talleres del número de veces que se emplea un buril determinado. Debido a ello, la aplicación de este estudio es más efectiva a nivel experimental o en laboratorios.

8. ANÁLISIS ECONÓMICO DEL MONITOREO DEL DESGASTE DE HERRAMIENTAS DE CORTE EN PROCESOS DE MECANIZADO DE METALES

Los tiempos actuales se caracterizan por un notable avance tecnológico, reflejado, por ejemplo, en la automatización de procesos y en la fabricación de máquinas eficientes con una gran cantidad de componentes electrónicos.

Sin embargo, estos tiempos también se han caracterizado por la crisis económico-financiera que agobia a varias regiones del mundo y en Guatemala no es la excepción. Es por ello de vital importancia incluir un análisis económico en cualquier estudio, investigación, proyecto o emprendimiento que pretenda llevarse a cabo.

En este capítulo se presenta un análisis económico específicamente para el monitoreo del desgaste en herramientas de corte, empleadas para el mecanizado de metales.

En los capítulos anteriores se presentaron varios métodos de monitoreo y evaluación; algunos (como los de los capítulos 6 y 7), son básicamente repeticiones de ensayos, con herramientas de corte y materiales de trabajo distintos, que posibilitan una mayor comprensión analítica de algo tan complejo como el desgaste en herramientas de corte. Los métodos de evaluación y monitoreo presentados en los capítulos 3,4 y 5, en cambio, requieren de equipo electrónico y de informática (hardware y software); aparte de la mayor comprensión analítica que puedan proporcionar, implican también, una inversión económica.

Así, este capítulo se enfoca en aspectos económicos para el monitoreo y evaluación del desgaste en herramientas de corte, para un taller de metal-mecánica que cuente con máquinas-herramientas convencionales y modernas (torno y fresadora CNC).

8.1. Piezas que se fabrican en un taller de metal-mecánica

Como ya se mencionó, en un taller de metal-mecánica son comunes las máquinas-herramientas, tales como: torno, taladro de columna, fresadora y cepillo. Entre los elementos de máquinas que se fabrican en Guatemala, están:

- Bujes: estos son componentes empleados en maquinaria agrícola, de construcción y camiones.
- Ejes.
- Cilindros.
- Engranajes rectos, cónicos y helicoidales.

Además, también se fabrican moldes utilizables en las industrias plásticas y del calzado. Se muestran en la figura 78 bujes de distintos tamaños.

Figura 78. Bujes de bronce de distintos tamaños



Fuente: <http://www.multibujes.com.ar/fotos/SF-2.jpg>. Consulta: 5 de marzo de 2013.

En la figura 79 se muestra un engrane helicoidal; esta pieza de maquinaria se fabrica mediante el proceso de mecanizado del fresado.

Figura 79. **Engrane helicoidal**



Fuente: http://img.directindustry.es/images_di/photo-m2/-54099-2839271.jpg. Consulta: 5 de marzo de 2013.

Para alcanzar los objetivos propuestos en este capítulo, se contó con la colaboración del taller de metal-mecánica Tornos SERTECTO JJ, ubicado en la 2da avenida 4-73 zona 4 de Mixco, Montserrat I; este cuenta con las máquinas-herramientas siguientes:

- Torno convencional: marca Heller, fabricación alemana, potencia del motor 4 kilovatios, voltaje 240 voltios trifásico, rango de velocidades del husillo 37-1600 rpm.
- Fresadora universal: marca Heller, fabricación alemana, las dimensiones de la mesa son 1320 X 320 milímetros, potencia del motor 4 kilovatios, voltaje 240 voltios trifásico, rango de velocidades del husillo 58-1800 rpm.

- Fresadora CNC: marca Heller, fabricación alemana, las dimensiones de la mesa son 800 X 510 milímetros, recorridos en los ejes x, y, z, 800 * 500 * 500 milímetros respectivamente; rango de velocidades del husillo del servomotor 40-6000 rpm; potencia del servomotor del husillo 7.5 kilovatios; potencia de los servomotores en los ejes x, y, z 1.5 kilovatios.

Dentro de los planes futuros del taller está la adquisición de un torno CNC horizontal marca FEMCO, modelo HL-35 DMSY, como el mostrado en la figura 80.

Figura 80. **Torno CNC horizontal FEMCO HL-35 DMSY**



Fuente: <http://www.metalmecanica.com/mm/formas/96177/89874.jpg>. Consulta: 6 de marzo de 2013.

Este torno CNC reduce los tiempos de producción, ya que tiene suficientes herramientas de corte móviles, lo cual posibilita la ejecución de una mayor cantidad de trabajo de mecanizado sobre la pieza de trabajo, sin necesidad de cambiar la herramienta de corte. Cuenta además, con dos husillos en el eje Y, lo cual permite el mecanizado en el interior y el exterior de una pieza de trabajo simultáneamente, haciendo así más preciso el trabajo. Esta máquina-herramienta automática se planea utilizar para la fabricación de moldes utilizables en la industria del calzado.

8.2. Información, datos y costo de las herramientas de corte

La información y datos sobre las herramientas de corte incluyen el material del que están fabricadas, el material de trabajo que se puede trabajar con ellas y el tipo de mecanizado a realizar.

8.2.1. Criterio para la elección de herramientas de corte en el torneado

Como se señaló en el capítulo 7, en el torneado convencional los principales criterios al elegir un buril son: el material de la pieza de trabajo y el tipo de mecanizado a realizar (refrentado, desbaste, cilindrado, etc.) Los buriles más comunes son los HSS-Co; en el punto 1.2.2 se mencionan según el tipo de mecanizado a realizar.

En el caso del torneado CNC se emplean herramientas de corte cerámicas, básicamente de dos tipos:

- Basadas en el óxido de aluminio (Al_2O_3)
- Basadas en el nitruro de silicio (Si_3N_4)

Las herramientas de corte cerámicas basadas en el Si_3N_4 son de mejor calidad que las de Al_2O_3 , debido a su mayor resistencia a los choques térmicos y a su tenacidad más elevada.

En Guatemala, en tornos CNC se emplean también, buriles de tungsteno con revestimientos de titanio y de cobalto. En algunos talleres de metal-mecánica, sin embargo, los portaburiles en los tornos CNC se sustituyen por portainsertos. De esta manera, los buriles se sustituyen por insertos de tungsteno con revestimientos de titanio.

El principal criterio para la elección de un buril (o inserto) al emplear un torno CNC es el material de la pieza de trabajo, además se procura que este material no sea abrasivo y que la pieza en sí sea redonda, lo que previene al buril de un desgaste excesivo.

8.2.2. Criterio para la elección de herramientas de corte en el fresado

El criterio común para la elección de herramientas de corte en el fresado y el torneado es el material de la pieza de trabajo. Adicionalmente, en el fresado CNC se aplican los criterios siguientes:

- Movimiento de avance
- Velocidad de corte
- Diámetro de la herramienta de corte o fresa

El material que se mecaniza frecuentemente en Guatemala con fresadoras o tornos CNC es el acero duro; le sigue el mecanizado de aluminio.

En el fresado convencional y en el fresado CNC se considera que el principal factor que influye en un desgaste excesivo de la fresa es la dureza del material de la pieza de trabajo. Tanto en el torneado como en el fresado CNC el rango de velocidades de giro de la pieza de trabajo pueden variar según el diámetro de la misma (por ejemplo 2 000 revoluciones por minuto en el caso de diámetros pequeños y 800 revoluciones por minuto en el caso de diámetros grandes); esta velocidad de giro influye también, en el desgaste de las herramientas de corte.

8.2.3. Criterio para la elección de herramientas de corte en el taladrado

La vida útil de una broca a emplearse en un taladro de columna se determina por el desgaste de flanco o de incidencia. Según el material de la pieza de trabajo, una broca se puede elegir así:

- Acero duro: brocas de acero rápido HSS-Co.
- Aluminio: brocas de metales duros recubiertos y de metales duros a base de WC; también se emplean brocas de aceros rápidos pulvimetalurgicos (aceros producidos a partir de polvos metálicos).

Adicionalmente a ello, para la elección de una broca debe tenerse en cuenta el diámetro del agujero deseado, ya que una broca de diámetro reducido se desplaza más distancia en menos tiempo. La profundidad del agujero es también muy importante, ya que al taladrar muchos agujeros poco profundos ocurren muchas entradas y salidas de la broca en el material de la pieza de trabajo, lo que acorta la vida útil de la broca.

8.2.4. Estimación de la vida útil y horas de uso de las herramientas de corte

Como se indicó en el punto 1.4, la vida útil de una herramienta de corte se determina por el desgaste de flanco V_B .

En la práctica, sin embargo, en Tornos SERTECTO JJ no se utiliza criterio alguno para determinar la vida útil de las herramientas de corte. Se efectuó una encuesta de campo en los siguientes talleres de metal-mecánica del área de la ciudad de Guatemala:

- Taller industrial Krones: ubicado en la 2da avenida "A" 9-84 zona 4 de Mixco, colonia Montserrat II.
- Tecnitornos: ubicado en la Calzada San Juan, 10-31 "A" zona 4 de Mixco, colonia Monte Real.
- Taller AGMA: ubicado en la Avenida Petapa 18-70 zona 12.
- Taller industrial Chávez: ubicado en la 14 avenida 8-24 zona 12.
- Taller de Tornos Barrios: ubicado en la 7 avenida 6-57 zona 7, colonia Quinta Samayoa.

Entre las preguntas incluidas en la encuesta, se incluyó una acerca del criterio empleado para determinar la vida aproximada de una herramienta de corte; en todos los casos, sin excepción, la respuesta fue que no se empleaba criterio alguno para determinar la vida aproximada de una herramienta de corte.

Asimismo, en los talleres de metal-mecánica mencionados arriba no existe control alguno de las horas de uso de las herramientas de corte.

Por ejemplo, en el caso del taladrado, la vida de la herramienta de corte o broca se puede determinar tanto por las horas de uso como por la cantidad de agujeros perforados con la broca, sin embargo tampoco se lleva un control de esa cantidad de agujeros en los talleres consultados.

Lo anterior implica que al efectuar un análisis económico del monitoreo del desgaste en herramientas de corte, se debe trabajar con supuestos en la estimación de la vida útil y horas de uso de los buriles, fresas o brocas.

8.2.5. Costo en el mercado de las herramientas de corte

Se consultaron los precios de buriles y fresas de HSS-Co con el proveedor de herramientas de corte; estos precios se detallan en la tabla IX.

Tabla IX. **Precios de buriles y fresas verticales**

Herramienta	Medida	Precio
Buril HSS-Co	1/8 in	Q.160,00
Buril HSS-Co	1/4 in	Q.140,00
Fresa vertical HSS-Co	1/8 in	Q.270,00
Fresa vertical HSS-Co	1/4 in	Q.190,00

Fuente: La Casa de las Brocas.

8.3. Inversión para realizar el monitoreo del desgaste en herramientas de corte

Se presentan a continuación los costos iniciales para efectuar el monitoreo y evaluación del desgaste en herramientas de corte mediante los métodos descritos en los capítulos 3, 4 y 5, los cuales pueden llegar a tener una aplicación práctica en talleres de metal-mecánica.

Los métodos descritos en los capítulos 6 y 7 son considerados puramente experimentales y de ensayo en laboratorios.

8.3.1. Inversión inicial del monitoreo con sensor de proximidad de fibra óptica (SPFO)

En el punto 3.3.2 se detallaron los componentes del montaje experimental del monitoreo con SPFO. En la tabla X se detallan los precios y las características principales de cada componente.

Tabla X. **Precios y características de los componentes para el monitoreo con SPFO**

Componente	Características	Proveedor	Precio
SPFO	Marca Banner, modelo 20736, fabricación estadounidense, código BAT26SM900	Dimeint (México)	US\$ 270,00
Tarjeta de adquisición de datos ⁽⁹⁾	Tarjeta DAQ, modelo ME Foxx, precisión de 16 bits, puertos ópticos de entrada, funciona en ambiente Windows o Linux e incluye driver	SAT, S.A. (Guatemala)	US\$ 650,00
Desarrollo de software	Programa necesario para el procesamiento de datos	SAT, S.A. (Guatemala)	US\$ 500,00
Computadora personal	Genérica, disco duro de 500 GB, memoria RAM de 2GB, monitor LED de 15.6", procesador Intel Dual Core 2.9	MACRO Sistemas (Guatemala)	US\$ 400,00
Cableados	Patchcords de 1 metro mono-modo de fibra óptica	IMPELSA (Guatemala)	US\$ 25,00
		TOTAL	US\$ 1 845,00

Fuente: elaboración propia.

8.3.2. Inversión inicial del monitoreo inteligente del proceso de torneado

A continuación se presenta una descripción de la inversión inicial del monitoreo inteligente del proceso de torneado.

Tabla XI. Precios y características de los componentes para el monitoreo inteligente del proceso de torneado

Componente	Características	Proveedor	Precio
Sensor de emisión acústica ⁽¹⁰⁾	Marca Siemens, modelo AS100, rango de frecuencia de 75 a 175 kHz, salida analógica de 0-10 VDC	Siemens (Guatemala)	US\$ 145,00 (incluyendo gastos de envío)
Dinamómetro digital ⁽¹¹⁾	Marca TYP Instruments, rango de fuerzas de 0-1000 N, permite la configuración de fuerzas máximas y mínimas, salida de datos mediante puerto USB	DACSA (Guatemala)	US\$ 630,00
Acelerómetro ⁽¹²⁾	Marca Metra, fabricación alemana, rango de 25 a 50 mm/seg, ancho de banda de 1.5 a 1 kHz, salida de 4-20 mA, encapsulado en acero inoxidable	SENSING (España)	US\$ 220,00 (incluyendo gastos de envío)
Analizador de vibraciones ⁽¹³⁾	Rango de frecuencia de 10 a 1 kHz, rango de aceleración de 0.5 a 199.9 m/seg ² , resolución de 0.1 m/seg ²	PCE Ibérica (España)	US\$ 985,00 (incluyendo gastos de envío)
		TOTAL	US\$ 1 980,00

Fuente: elaboración propia.

En el punto 4.3 se detallaron los componentes del montaje experimental del monitoreo inteligente del proceso de torneado. En la tabla XI se detallan los precios y las características principales de cada componente; información adicional de cada uno de ellos se puede obtener en las direcciones de Internet siguientes:

- Sensor de emisión acústica: <http://www.controltechnics.com.ar/productos-siemens/es/Novedades%20Siemens/2838.htm>.
- Dinamómetro: <http://www.typ-instrumentos.com/dinamometros/dinamometro-typ-efg.html>
- Acelerómetro: http://www.sensores-de-medida.es/sensing_sl/SENSORES-Y-TRANSDUCTORES_35/Aceler%C3%B3metros---Sensores-de-aceleraci%C3%B3n_49/Aceler%C3%B3metros-piezoel%C3%A9ctricos_50/
- Analizador de vibraciones: <http://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/instrumento-de-vibracion/analizador-vm-120.htm>.

A lo detallado en la tabla XI, se le debe agregar el costo de una computadora personal con las mismas características de la mencionada en la tabla X; este costo es de US\$ 400,00.

Se muestra en la figura 81 un dinamómetro digital marca TYP Instruments, como el incluido en la tabla XI; este dinamómetro se caracteriza por ser aplicable en pruebas de laboratorio.

Figura 81. **Dinamómetro digital marca TYP instruments**



Fuente: <http://www.typ-instrumentos.com/images/stories/TYP/Dinamometros/TYP-EFG%20XXX%20Imagen%201.jpg>. Consulta: 5 de junio de 2013.

8.3.3. Inversión inicial del monitoreo del fresado de moldes en tiempo real

En el numeral 5.2 se detalló la plataforma experimental para realizar el monitoreo del fresado de moldes en tiempo real; adicionalmente, para este monitoreo se requiere software y un analizador de redes eléctricas. En la tabla XII se detallan los precios y las características de cada componente.

Tabla XII. **Precios y características de los componentes para el monitoreo del fresado de moldes en tiempo real**

Componente	Características	Proveedor	Precio
Sensor dinámometro	Capta señales de fuerza de corte y par en un rango de 15 Nm a 80kNm, ancho de banda 6kHz	HBM (España)	US\$ 700,00 (incluyendo gastos de envío)
Cámara CCD	Marca Sharp, modelo DR-424, sensor de imagen 1/3 CCD	Equipos Integrados, S.A. (Guatemala)	US\$ 500,00
Analizador de redes eléctricas		Equipos Integrados, S.A. (Guatemala)	US\$ 150,00 (alquiler diario)
Dinámometro rotativo	Marca Kistler, modelo 9124 A, permite obtener fuerzas de corte en el proceso de fresado	HBM (España)	US\$ 800,00 (incluyendo gastos de envío)
Software ASPEN Neural SIM		El software se descarga en Internet.	
		TOTAL	US\$ 2 300,00

Fuente: elaboración propia.

Información adicional de cada uno de los componentes detallados en la tabla XII se puede obtener en las direcciones de Internet siguientes:

- Sensor dinamómetro: http://www.hbm.com/es/menu/productos/transductores-y-sensores/par/t40fm/?geoip_cn=17.
- Cámara CCD: <http://www.bigpoint.com.ar/video-vigilancia/camara-ccd-shar-p-dr-424-infrarroja>.
- Descarga del software ASPEN Neural SIM: http://www.filebuzz.com/findsoftware/Aspen_Simulator_Download/1.html

Para el objetivo de estudio de este capítulo, se supondrá que el analizador de redes se empleará por dos días. En la figura 82 se muestran sensores dinamométricos como el detallado en la tabla XII.

Figura 82. **Sensores dinamométricos**



Fuente: <http://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/products/T40FM.jpg>. Consulta: 6 de junio de 2013.

8.4. Análisis económico de los métodos de monitoreo de desgaste en herramientas de corte

Para efectuar el análisis económico se emplearán dos métodos para la evaluación de alternativas de inversión: el Valor Presente Neto y la Tasa Interna de Rendimiento.

8.4.1. Definición de Valor Presente Neto (VPN)

El Valor Presente Neto (VPN) es un método para la evaluación de alternativas de inversión, en el cual los gastos e ingresos futuros de una propuesta se transforman en dinero equivalente hoy. Todos los flujos de caja futuros asociados a una alternativa son convertidos a valores de dinero presente.

El VPN suele aplicarse al evaluar dos alternativas, de vidas útiles iguales o distintas. Si en el flujo de caja de una alternativa se toman en cuenta desembolsos e ingresos, los desembolsos se consideran negativos y los ingresos positivos. La expresión para calcular el VPN es:

$$\text{VPN} = P + A (P/A, i \%, n) + F (P/F, i \%, n) \quad (\text{ecuación 1})$$

En esta ecuación P es la inversión inicial de la alternativa de inversión, el término A (P/A, i %, n) representa una anualidad y el término F (P/F, i %, n) representa un desembolso o ingreso en un momento específico durante la vida útil de la alternativa de inversión; i es la tasa de interés y n es el tiempo en el que ocurren los desembolsos o ingresos.

8.4.2. Definición de Tasa Interna de Rendimiento (TIR)

La Tasa Interna de Rendimiento (TIR) es el interés que convierte el VPN de cualquier flujo de caja en cero.

La TIR es la tasa de interés ganada sobre el saldo no recuperado de una inversión o préstamo, de tal manera que el pago o ingreso final lleva el saldo a cero, tomando en cuenta el interés.

Para determinar el valor de la TIR de un proyecto, el VPN de los desembolsos se debe igualar al VPN de los ingresos.

$$VPN_D = VPN_I \quad (\text{ecuación 2})$$

8.4.3. Consideraciones para el cálculo de la TIR en el monitoreo del desgaste en herramientas de corte

El análisis económico se realizará con datos proporcionados por el encargado y el personal del taller de la empresa Tornos SERTECTO JJ.

Para realizar el análisis económico del monitoreo del desgaste en herramientas de corte, se calculará la TIR considerando lo siguiente:

La tasa de interés para realizar los cálculos es del 10 por ciento.

Se estima un ahorro del 10 por ciento en los costos por energía eléctrica de las máquinas-herramientas; esta estimación de ahorro se incluye en el diagrama de flujo de caja como un ingreso anual.

- Se estima también un ahorro del 10 por ciento en los costos asociados a piezas de trabajo (en este caso aceros); esta estimación también se incluye en el diagrama de flujo de caja como un ingreso anual.
- Aproximadamente un 5 por ciento del tiempo efectivo de trabajo, un operario de la máquina-herramienta en Tornos SERTECTO JJ, lo emplea en realizar compras de herramientas de corte e insumos para reciclar las mismas.
- Se estima un ahorro del 50 por ciento en los costos de herramientas de corte al implementar el monitoreo de desgaste de herramientas de corte; este ahorro se incluye en el diagrama de flujo de caja como un ingreso anual.
- La vida útil estimada de las máquinas-herramientas, según su volumen actual de trabajo, es 15 años.
- Se estima un ahorro del 75 por ciento en los costos asociados al reciclaje de herramientas de corte.
- En cada caso, se incluye un valor de rescate esperado de los componentes para realizar cada monitoreo.

8.4.4. Cálculo de la TIR para el monitoreo con SPFO

Según los datos de la tabla X, la inversión inicial para efectuar el monitoreo con SPFO totaliza US\$ 1 845,00; realizando la conversión a quetzales a una tasa de cambio de Q.7,82 por US\$ 1,00 el total es Q. 14 427,90.⁶

⁶ Todas las conversiones en este capítulo se realizan a la tasa de cambio vigente según el BANGUAT, al 26 de junio de 2013.

Es importante señalar que en la mayoría de las empresas, el ahorro cuantificado en horas-hombre, es un dinero que ya se desembolsa mediante el pago del horario normal de labor de cada trabajador, lo que implica que se pueden realizar otras actividades en ese horario que eleven la rentabilidad de los negocios; esto a su vez significa que existirán horas adicionales para el crecimiento de la empresa.

Se estima una vida útil de los componentes para el monitoreo con SPFO de 10 años. Adicionalmente a ello se supone un valor de rescate de los componentes para el monitoreo con SPFO de Q. 5 000,00 En la tabla XIII se incluyen los datos para el cálculo de la TIR.

Tabla XIII. **Datos para el cálculo de la TIR para el monitoreo con SPFO**

Concepto	Valor
Inversión inicial	Q.14 427,90
Ahorro anual de energía eléctrica	Q.300,00
Ahorro anual en horas-hombre por compras de herramientas de corte	Q.1 800,00
Ahorro anual en materiales de trabajo (aceros)	Q.1 500,00
Ahorro anual en herramientas de corte	Q.600,00
Ahorro anual en reciclaje de herramientas de corte	Q.350,00
Valor de rescate	Q.5 000,00
Vida útil en años de los componentes para el monitoreo	10

Fuente: elaboración propia.

Para calcular la TIR, previamente se debe calcular el VPN, empleando la ecuación (1). Se considera una tasa de interés del 10 por ciento, la cual refleja el costo de capital.

$$VPN = P + A (P/A, i \%, n) + F (P/F, i \%, n)$$

$$i = 10 \%$$

$$n = 10 \text{ años}$$

En el presente caso, los desembolsos se toman como negativos y los ingresos como positivos; para efectos de cálculo, los ahorros se consideran como anualidades. El Diagrama de Flujo de Caja se muestra en la figura 83.

Figura 83. **Diagrama de Flujo de Caja para el monitoreo con SPFO**



Fuente: elaboración propia.

Los cálculos se muestran a continuación:

$$\begin{aligned} \text{VPN} = & -14\,427,90 + 300 (A/P, 10 \%, 10) + 1\,800 (A/P, 10 \%, 10) \\ & + 1\,500 (A/P, 10 \%, 10) + 600 (A/P, 10 \%, 10) + 350 (A/P, 10\%, 10) \\ & + 5\,000 (P/F, 10 \%, 10) \end{aligned}$$

En el caso de las anualidades se emplea la siguiente expresión:

$$P = A [(1 + i)^n - 1] / [i (1 + i)^n] \quad (\text{ecuación 3})$$

A es el valor de la anualidad.

El valor de rescate es un ingreso que se obtendría al final de la vida útil del proyecto de monitoreo con SPFO. En el caso de ingresos o desembolsos en tiempos específicos se emplea la siguiente expresión:

$$P = F [1 / (1+i)^n] \quad (\text{ecuación 4})$$

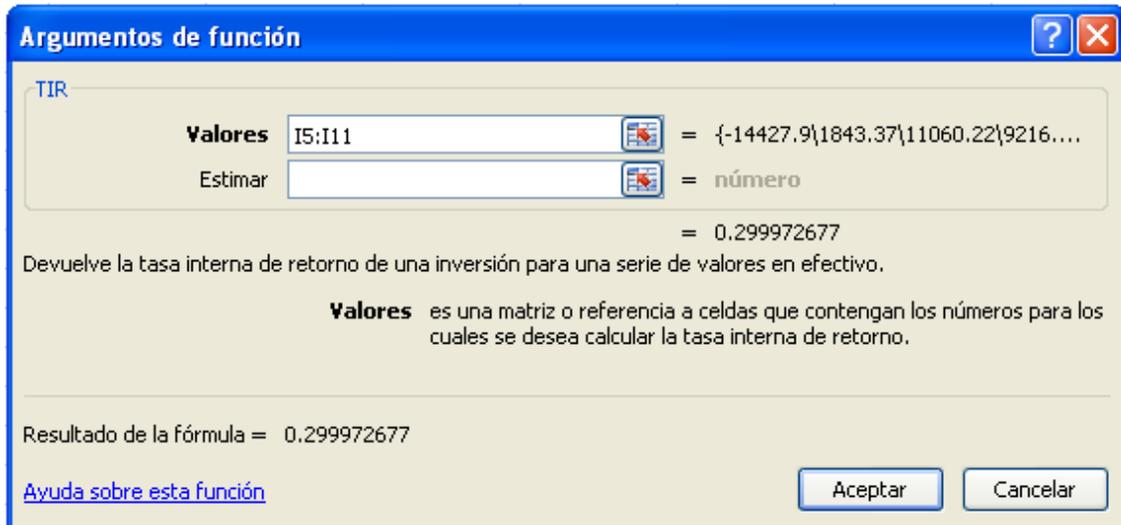
F es el valor del ingreso o desembolso respectivo.

$$\begin{aligned} \text{VPN} = & -14\,427,9 + 1\,843,37 + 11\,060,22 + 9\,216,85 + 3\,686,74 + 2\,150,60 \\ & + 1\,927,72 \end{aligned}$$

$$\text{VPN} = \text{Q. } 15\,457,60$$

La TIR se elaboró en Excel, ingresando los datos en celdas y luego ejecutando la función; esto se muestra en la figura 84.

Figura 84. **Cálculo de la TIR del monitoreo con SPFO**



Fuente: elaboración propia.

El resultado de la TIR fue 30 por ciento. El criterio de decisión para aceptar una propuesta debe ser si la TIR es mayor que la tasa de interés del costo de capital, en este caso $i = 10$ por ciento; en caso contrario, la propuesta de inversión debe rechazarse. Según esto, se debe aceptar la propuesta del monitoreo con SPFO para el taller de Tornos SERTECTO JJ.

8.4.5. Cálculo de la TIR para el monitoreo inteligente del proceso de torneado

Según los datos de la tabla XI, la inversión inicial para efectuar el monitoreo inteligente del proceso de torneado totaliza US\$ 2 380,00; se incluye en esta inversión inicial el costo de la computadora personal (US\$ 400,00). Realizando la conversión a quetzales a una tasa de cambio de Q.7,82 por US\$ 1,00 el total es Q. 18 611,00.

Con respecto al monitoreo con SPFO, los datos para el cálculo de la TIR del monitoreo inteligente del proceso de torneado difieren debido a que las expectativas de ahorro cambian; por ejemplo, con los materiales de trabajo, se espera un ahorro mayor que por el volumen de trabajo es mayor, empleando el torno en lugar de la fresadora en Tornos SERTECTO JJ.

En la tabla XIV se muestran los datos para el cálculo de la TIR para el monitoreo inteligente del proceso de torneado.

Tabla XIV. **Datos para el cálculo de la TIR del monitoreo inteligente del proceso de torneado**

Concepto	Valor
Inversión inicial	Q.18 611,00
Ahorro anual de energía eléctrica	Q.300,00
Ahorro anual en horas-hombre por compras de herramientas de corte	Q.1 800,00
Ahorro anual en materiales de trabajo (aceros)	Q.1 800,00
Ahorro anual en herramientas de corte	Q.800,00
Ahorro anual en reciclaje de herramientas de corte	Q.400,00
Valor de rescate	Q.5 000,00
Vida útil en años de los componentes para el monitoreo	10

Fuente: elaboración propia.

Nuevamente, para calcular la TIR, previamente se debe calcular el VPN, empleando la ecuación (1). Se considera una tasa de interés del 10 por ciento, la cual refleja el costo de capital.

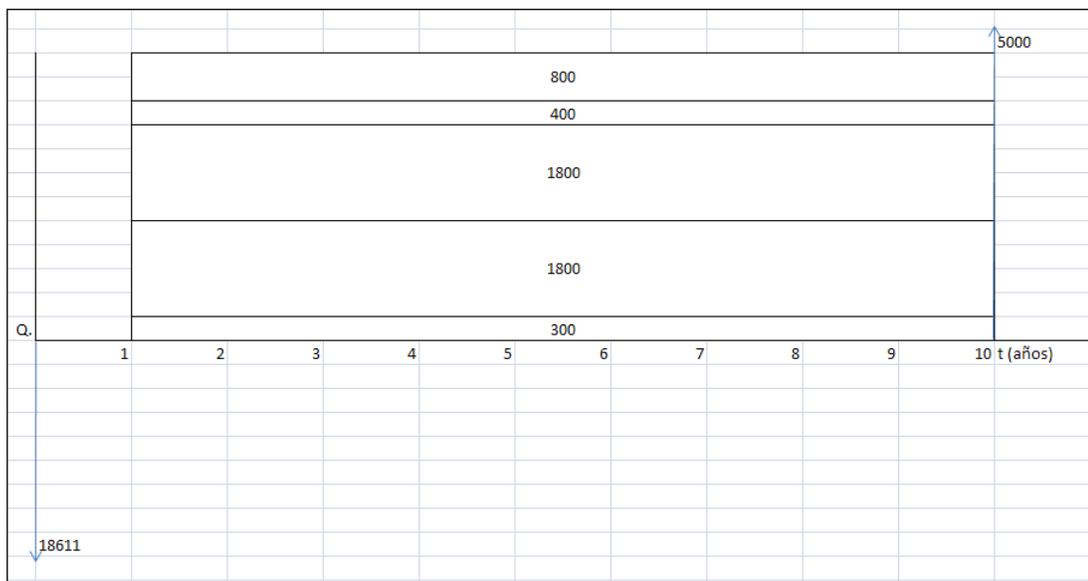
$$VPN = P + A (P/A, i \%, n) + F (P/F, i \%, n)$$

$$i = 10 \%$$

$$n = 10 \text{ años}$$

El Diagrama de Flujo de Caja se muestra en la figura 85.

Figura 85. **Diagrama de Flujo de Caja del monitoreo inteligente del proceso de torneado**



Fuente: elaboración propia.

Los cálculos se muestran a continuación:

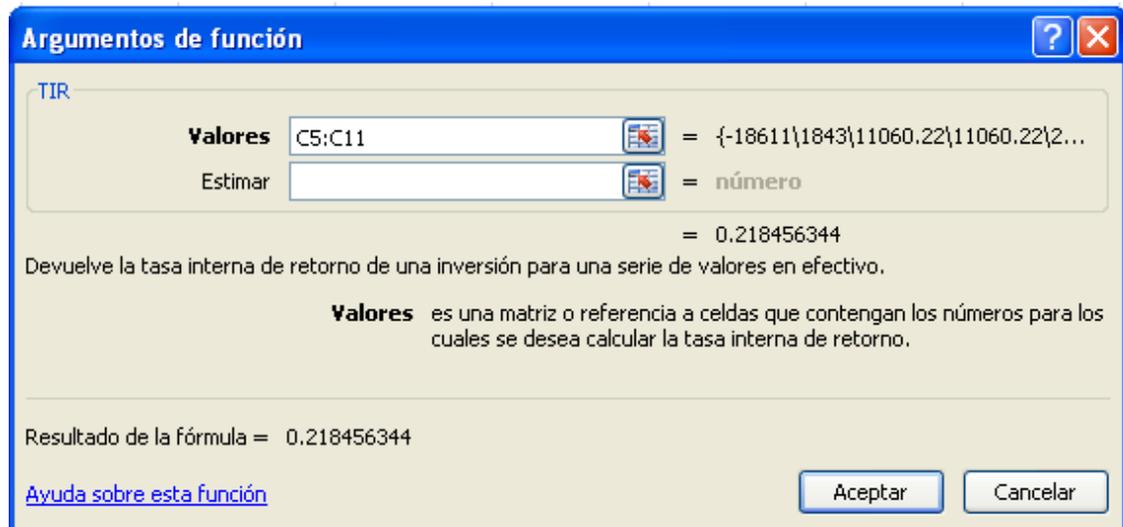
$$\text{VPN} = -18611 + 300 (\text{A/P}, 10 \%, 10) + 1800 (\text{A/P}, 10 \%, 10) + 1800 (\text{A/P}, 10 \%, 10) + 400 (\text{A/P}, 10 \%, 10) + 800 (\text{A/P}, 10 \%, 10) + 5000 (\text{P/F}, 10 \%, 10)$$

$$\text{VPN} = -18611 + 1843 + 11060.22 + 11060.22 + 2457.83 + 4915.65 + 1927.72$$

$$\text{VPN} = \text{Q. } 14\,653,64$$

La TIR se elaboró en Excel, ingresando los datos en celdas y luego ejecutando la función; esto se muestra en la figura 86.

Figura 86. **Cálculo de la TIR para el monitoreo inteligente del proceso de torneado**



Fuente: elaboración propia.

El resultado de la TIR fue 21 por ciento. El criterio de decisión para aceptar una propuesta debe ser si la TIR es mayor que la tasa de interés del costo de capital, en este caso $i = 10$ por ciento; en caso contrario, la propuesta de inversión debe rechazarse. Según esto, se debe aceptar la propuesta del monitoreo inteligente del proceso de torneado para el taller de Tornos SERTECTO JJ.

8.4.6. Cálculo de la TIR para el monitoreo del fresado de moldes en tiempo real

Según los datos de la tabla XII, la inversión inicial para efectuar el monitoreo del fresado de moldes en tiempo real totaliza US\$ 2 300,00; realizando la conversión a quetzales a una tasa de cambio de Q.7,82 por US\$ 1,00 el total es Q. 21 114,00.

En esta inversión inicial se incluye el alquiler del analizador de redes eléctricas por dos días únicamente; se estima que en dos días se pueden obtener datos suficientes de la señal de corriente en los servomotores y de la potencia en kilovatios consumida por la fresadora CNC. Se incluye también el precio de una computadora personal (US\$ 400,00).

Los valores de ahorros estimados presentados en la tabla XV difieren de los presentados en las tablas XIII y XIV, debido a que en este caso el material de trabajo será, principalmente aluminio y los volúmenes de trabajo en la fresadora CNC son un poco menores que en el torno y la fresadora convencional en el taller de Tornos SERTECTO JJ.

Asimismo, el valor de rescate esperado es menor debido a que para el monitoreo del fresado de moldes se emplean menos componentes.

En la tabla XV se muestran los datos para el cálculo de la TIR del monitoreo del fresado de moldes en tiempo real.

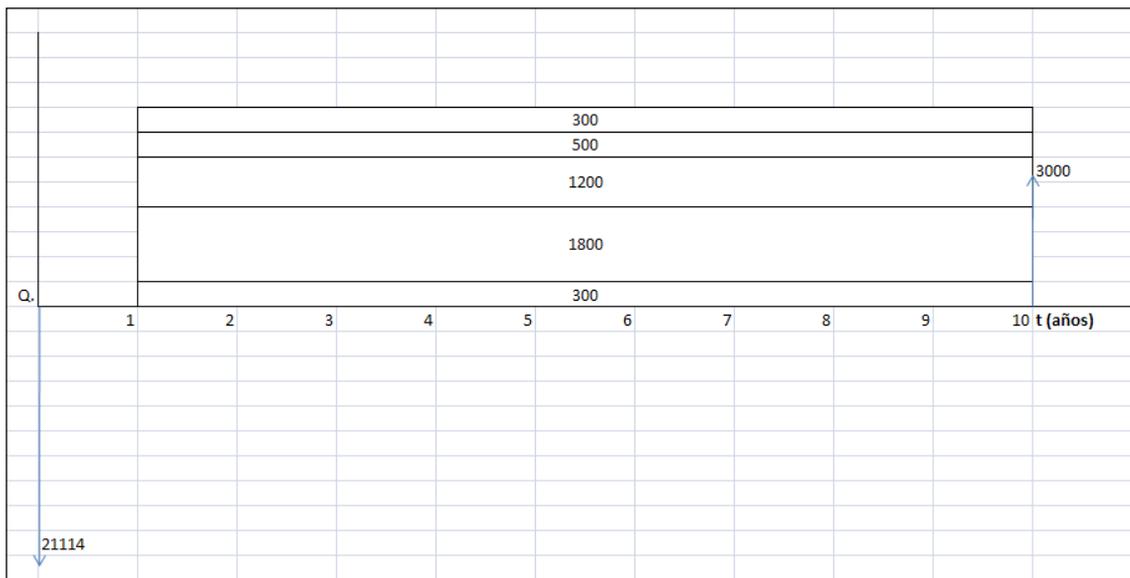
Tabla XV. **Datos para el cálculo de la TIR del monitoreo del fresado del moldes en tiempo real**

Concepto	Valor
Inversión inicial	Q.21 114,00
Ahorro anual de energía eléctrica	Q.300,00
Ahorro anual en horas-hombre por compras de herramientas de corte	Q.1 800,00
Ahorro anual en materiales de trabajo (aluminios)	Q.1 200,00
Ahorro anual en herramientas de corte	Q.500,00
Ahorro anual en reciclaje de herramientas de corte	Q.300,00
Valor de rescate	Q.3 000,00
Vida útil en años de los componentes para el monitoreo	10

Fuente: elaboración propia.

El Diagrama de Flujo de Caja para el monitoreo del fresado de moldes en tiempo real se muestra en la figura 87.

Figura 87. **Diagrama de Flujo de Caja para el monitoreo del fresado de moldes en tiempo real**



Fuente: elaboración propia.

Los cálculos se muestran a continuación:

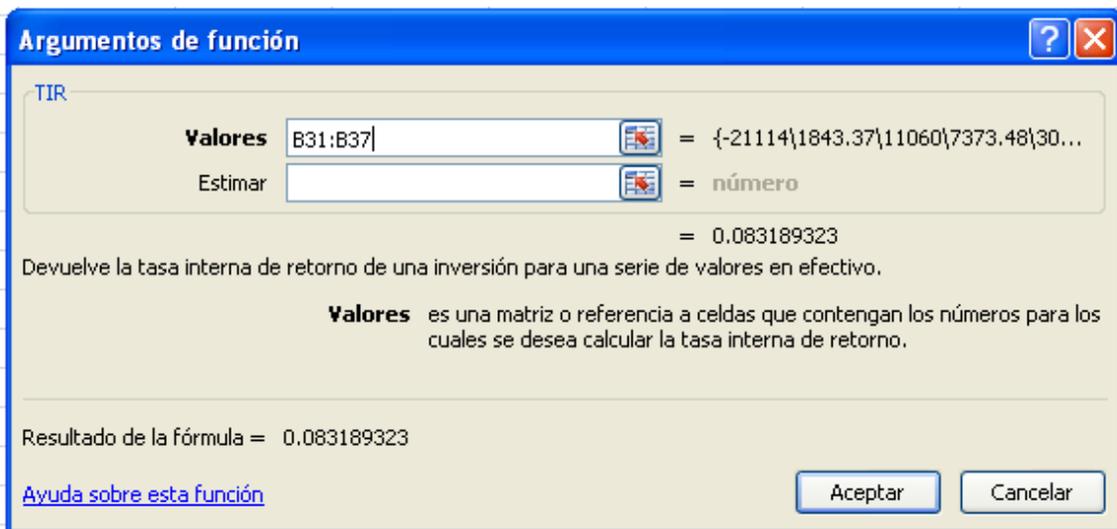
$$VPN = -21114 + 300 (A/P, 10 \%, 10) + 1800 (A/P, 10 \%, 10) + 1200 (A/P, 10 \%, 10) + 500 (A/P, 10 \%, 10) + 300 (A/P, 10 \%, 10) + 3000 (P/F, 10 \%, 10)$$

$$VPN = -21114 + 1843.37 + 11060 + 7373.48 + 3072.28 + 1843.37 + 1156.63$$

$$VPN = Q. 5 235,13$$

La TIR se elaboró en Excel, ingresando los datos en celdas y luego ejecutando la función; esto se muestra en la figura 88.

Figura 88. **Cálculo de la TIR para el monitoreo del fresado de moldes en tiempo real**



Fuente: elaboración propia.

El resultado de la TIR fue 8 por ciento. El criterio de decisión para aceptar una propuesta debe ser si la TIR es mayor que la tasa de interés del costo de capital, en este caso $i = 10$ por ciento; en caso contrario, la propuesta de inversión debe rechazarse. Según esto, no se debe aceptar la propuesta del monitoreo inteligente del proceso de torneado para el taller de Tornos SERTECTO JJ.

El hecho de que la propuesta de inversión para el monitoreo de fresado de moldes en tiempo real no sea viable en Tornos SERTECTO JJ, no implica que

no pueda aplicarse en otro taller o empresa, sino que depende de los volúmenes de trabajo y de producción respectivos.

8.5. Resumen comparativo de los métodos de monitoreo de desgaste en herramientas de corte

Se muestra en la tabla XVI un resumen comparativo de cada uno de los métodos de monitoreo de desgaste en herramientas de corte vistos en este capítulo; esto de acuerdo al análisis efectuado en Tornos SERTECTO JJ.

Tabla XVI. **Resumen comparativo de los métodos de monitoreo del desgaste en herramientas de corte**

Método	Inversión inicial	TIR	Aceptación o rechazo en Tornos SERTECTO JJ
Monitoreo con SPFO	Q.14 427,90	30 %	Aceptado
Monitoreo inteligente del proceso de torneado	Q.18 611,00	21 %	Aceptado
Monitoreo del fresado de moldes en tiempo real	Q.21 114,00	8 %	Rechazado

Fuente: elaboración propia.

Es importante señalar que, conforme el paso del tiempo, la mano de obra tiende a encarecerse, debido básicamente a la inflación. Debido a ello, hay empresas (principalmente aquellas que se ven a sí mismas en muchos años a futuro dentro del mercado) que estarían dispuestas en invertir en soluciones como los métodos de monitoreo de desgaste en herramientas de corte analizados en este trabajo de graduación, ya que estas soluciones no se encarecen de la misma forma que la mano de obra.

Adicionalmente a ello, uno de los problemas que tiende a reducirse al invertir en soluciones como estos métodos de monitoreo, es que al cambiar de operarios la experiencia se pierde y suelen presentarse más errores que implican pérdidas de dinero, vía el deterioro de las herramientas de corte y más importante aún, vía el deterioro del material de las piezas de trabajo.

Los métodos de monitoreo de desgaste en herramientas de corte analizados tienen la ventaja de que al ser aplicados, las empresas no dependerían tanto de la mano de obra experimentada, para obtener procesos de manufactura eficientes.

CONCLUSIONES

1. El desgaste en herramientas de corte empleadas en máquinas-herramientas es un proceso gradual que depende del material de la pieza de trabajo, de la forma de la herramienta de corte, de la velocidad de corte y de los movimientos de avance y profundidad.
2. El valor VB (anchura de estría de desgaste de flanco) es el principal criterio de desgaste en una herramienta de corte y se emplea para determinar la vida útil de la misma.
3. Un sensor de fibra óptica (SPFO) posibilita un análisis preciso de desgaste de una fresa vertical en tiempo real, es decir cuando la herramienta de corte está trabajando.
4. Los controles inteligentes que emplean la lógica borrosa, al manejar incertidumbres y no linealidades intrínsecas de los procesos, son adecuados para el análisis de desgaste de herramientas de corte en el proceso de torneado.
5. En las redes neuronales, las señales internas que ofrecen datos relevantes del desgaste de la herramienta de corte son las de corriente, en el servomotor de la fresadora CNC, y de velocidad de traslación y de giro en el cabezal de la misma.

6. Por medio del FMEA se obtiene una representación fidedigna de la probabilidad de que en un tiempo t , el valor del desgaste en una broca alcance un nivel de VB (anchura de estría de desgaste de flanco) considerado crítico.

7. Los números adimensionales permiten utilizar los resultados experimentales, obtenidos en condiciones limitadas, en situaciones en las cuales se dispongan propiedades físicas y dimensiones geométricas diferentes a las obtenidas experimentalmente.

8. El monitoreo con SPFO y el inteligente tienen viabilidad de aplicación en Guatemala, luego de efectuarse un análisis económico.

RECOMENDACIONES

1. Es conveniente que existan acercamientos al estudio y análisis del desgaste en herramientas de corte desde un punto de vista técnico-académico.
2. Desarrollar a nivel académico prácticas experimentales o de laboratorio en las que se empleen sensores, transductores eléctricos y controles inteligentes, en función de resolver y/o analizar algún problema específico.
3. Diseñar montajes experimentales de procesos de torneado en alguna práctica de laboratorio a nivel académico para que se amplíen los alcances de los estudios presentados en este trabajo.
4. Considerar prácticas en Guatemala, empleando la automatización industrial con fines didácticos e investigativos.
5. Realizar otros estudios relacionados al desgaste de herramientas de corte (en el cepillo, por ejemplo) o a la soldadura, empleando análisis de confiabilidad.
6. En otros países el desgaste en herramientas de corte es un tema de permanente análisis e investigación, por lo que se considera que en el país sería conveniente realizar investigaciones en este tema, principalmente a nivel académico en universidades e institutos técnicos.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALTING, Leo. *Procesos para ingeniería de manufactura*. 3a ed. México: Alfaomega, 1990. 369 p.
2. BALCELLS, Josep; ROMERAL José Luis. *Automátas programables*. España: Alfaomega, 2003. 376 p.
3. BLANK, Leland. *Ingeniería económica*. 6a ed. México: McGraw-Hill, 1999. 725 p.
4. GERLING, Heinrich. *Alrededor de las máquinas-herramientas*. España: Reverte, 2000. 298 p.
5. GITMAN, Lawrence. *Principios de administración financiera*. 8a ed. México: Prentice Hall, 2000, 657 p.
6. HAMROCK, Bernard; JACOBSON, Bo y SCHMID, Steven. *Elementos de máquinas*. México: McGraw-Hill, 2000. 926 p.
7. KEYSER, Carl. *Ciencia de materiales de ingeniería*. México: Limusa, 1993. 460 p.
8. MALIK, Norbert. *Circuitos electrónicos*. España: Prentice Hall, 2000. 1136 p.

9. STREETER, Victor. Mecánica de fluidos. 6a ed. Colombia: McGraw-Hill, 1981. 775 p.
10. Universidad de Antioquía. Revista de la facultad de ingeniería [en línea]. Colombia. <<http://www.scielo.cl/pdf/ingeniare/v14n2/art05.pdf>> [Consulta: 20 de enero de 2012].
11. WALPOLE, Ronald; MYERS, Raymond. Probabilidad y estadística. 4a ed. México: McGraw-Hill, 1992. 797 p.