

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS
Departamento de Física Aplicada III (Electricidad y Electrónica)



TESIS DOCTORAL

**Evaluación en tiempo real de parámetros característicos de
un proceso de mecanizado para la estimación de las
condiciones de corte en una unidad de mecanizado
desatendido**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR
PRESENTADA POR

Luis Jenaro Barrios Bravo

DIRECTOR:

Salvador Ros Torrecillas

Madrid, 2015

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

Facultad de Ciencias Físicas

Departamento de Electricidad y Electrónica

TP
1988
181



* 5 3 0 9 8 7 5 7 5 6 *

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE

x-53-030966-0

**EVALUACION EN TIEMPO REAL DE
PARAMETROS CARACTERISTICOS DE UN
PROCESO DE MECANIZADO PARA LA
ESTIMACION DE LAS CONDICIONES DE CORTE
EN UNA UNIDAD DE MECANIZADO
DESATENDIDO**

Luis J. Barrios Bravo

Madrid, 1988

Colección Tesis Doctorales. N.º 181/88

© Luis J. Barrios Bravo

Edita e imprime la Editorial de la Universidad
Complutense de Madrid. Servicio de Reprografía
Noviciado, 3 - 28015 Madrid
Madrid, 1988
Ricoh 3700
Depósito Legal: M-5544-1988

**EVALUACION EN TIEMPO REAL DE
PARAMETROS CARACTERISTICOS DE UN
PROCESO DE MECANIZADO PARA LA
ESTIMACION DE LAS CONDICIONES DE
CORTE EN UNA UNIDAD DE MECANIZADO
DESATENDIDO**

MEMORIA

presentada por

Luis J. Barrios Bravo
para optar al grado de Doctor
en Ciencias Físicas

DIRECTORES

Dr. D. Salvador Ros

Dr. D. Jose Ramón Alique

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

Dpto. de Electricidad y Electrónica - FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS

MADRID 1986

Esta memoria, dirigida por los doctores D. Salvador Ros Torrecillas y D. José Ramón Alique López, fué presentada el día 17 de junio de 1986, y juzgada por el tribunal formado por los siguientes doctores:

- D. Maximino Rodríguez Vidal, Catedrático de Electricidad y Magnetismo de la Universidad Complutense.
- D. Rafael Aracil Santoja, Catedrático de Automática de la Universidad Politécnica de Madrid
- D. Sebastián Dormido Bencomo, Catedrático de Automática de la Universidad a Distancia.
- D. Antonio Hernández Cachero, Catedrático de Electrónica de la Universidad Complutense.
- D. Jaime Ruiz Fernández, Profesor Titular de Física Industrial de la Universidad Complutense

La calificación obtenida fué de APTO "CUM LAUDE" por unanimidad.

A mis padres

A mi mujer

Deseamos expresar nuestro agradecimiento por la valiosa ayuda prestada a los Doctores Ros Torrecillas y Alique López, compañeros y directores del presente trabajo. Extendemos nuestro reconocimiento muy especial a Enrique Cimadevila y Alberto Ibáñez por su valiosa colaboración. Igualmente queremos expresar nuestra gratitud a los Doctores Ramón Ceres y Leopoldo Calderón, a Eugenio Villanueva, Antonio Rodríguez, Alberto Dávila, Fernando Delgado, Marino Martínez, Adelaida Agote, Esperanza Blanco, Mercedes Palenciano, a la dirección y a los demás compañeros del Instituto de Automática Industrial que de una y otra forma han contribuido y facilitado la realización de este trabajo.

Finalmente queremos mencionar el apoyo que hemos recibido del Profesor D. Antonio Hernandez Cachero.

Arganda del Rey

Mayo 1986

INDICE

<u>INTRODUCCION</u>	1
<u>I.1. PROBLEMAS ACTUALES EN LA AUTOMATIZACION DE LOS PROCESOS DE MANUFACTURA</u>	2
<u>I.2. PROPOSITO DEL PRESENTE ESTUDIO</u>	5
<u>I.3. DESARROLLO</u>	7
<u>CAPITULO I: DURACION DE LAS HERRAMIENTAS DE CORTE METALICO</u>	12
<u>1.1. IMPORTANCIA DEL TEMA</u>	14
<u>1.2. DURACION DE LA HERRAMIENTA: DEFINICION Y CRITERIOS PARA SU DETERMINACION</u>	16
1.2.1. Desmoronamiento o fallo catastrófico.....	17
1.2.2. Variaciones en la geometría de la herramienta debidas a su desgaste.....	18
1.2.3. Degradación del acabado superficial.....	18
1.2.4. Otros criterios.....	19
<u>1.3. DESGASTE DE LAS HERRAMIENTAS</u>	22
1.3.1. Desgaste de la cara de incidencia principal.....	22

1.3.2. Desgaste de la cara de desprendimiento.....	33
1.3.3. Desgaste de la cara de incidencia secundaria y de la punta.....	34
1.4. <u>MECANISMOS DE DESGASTE</u>	39
1.4.1. Abrasión.....	39
1.4.2. Adhesión.....	40
1.4.3. Difusión.....	41
1.4.4. Acción química y electrolítica.....	42
1.5. <u>DETERMINACION DE LA VIDA DE LA HERRAMIENTA</u>	44
1.6. <u>FACTORES DE LOS QUE DEPENDE LA VIDA DE LAS HERRAMIENTAS</u> ..	46

<u>CAPITULO II: PREDICION DE LA VIDA DE LA HERRAMIENTA Y SUPERVISION DE SU ESTADO EN EL PROCESO DE CORTE</u>	57
--	----

2.1. <u>MODELOS DE PREDICION BASADOS EN LARGAS SERIES DE ENSAYOS</u>	60
2.1.1. Ecuación de Taylor.....	60
2.1.2. Ecuación de Taylor generalizada.....	65
2.1.2.1. Efecto del desgaste.....	65
2.1.2.2. Influencia del espesor de la viruta.....	66
2.1.2.3. Efecto del ancho de la viruta.....	68

VI

2.1.3. Ecuación de Kronenberg.....	71
2.1.4. Ecuación de Schallbroch y Schaumann.....	71
2.2. <u>MODELOS TEORICOS DE PREDICCION</u>.....	74
2.2.1. Ecuaciones basadas en el concepto de viruta equivalente.....	74
2.2.2. Ecuación de König-Depiereux.....	77
2.2.3. Modelos basados en la temperatura de corte.....	80
2.2.4. Otros trabajos.....	85
2.3. <u>MODELOS EXPERIMENTALES Y ESTADISTICOS DE PREDICCION</u>.....	87
2.4. <u>UTILIDAD DE LOS MODELOS</u>.....	92
2.5. <u>SUPERVISION DEL MECANIZADO</u>.....	94
2.6. <u>REVISION DE LA ACTUAL TECNOLOGIA DE SENSORES PARA EL SEGUIMIENTO Y CONTROL DEL MECANIZADO</u>.....	97
2.6.1. Sensores dimensionales.....	97
2.6.1.1. Sondas de contacto.....	97
2.6.1.2. Sensores de proximidad.....	98
2.6.2. Sensores de esfuerzos.....	99
2.6.3. Sensores de temperatura.....	101
2.6.4. Sensores de corriente y potencia eléctrica.....	102
2.6.5. Sensores de emisión acústica.....	104
2.6.6. Sensores basados en otros principios.....	105
2.6.6.1. Sensores de resistencia eléctrica.....	105
2.6.6.2. Sensores de vibración de la herramienta..	106

VII

2.6.6.3. Sensores de radiactividad106
2.6.6.4. Medida de la rugosidad superficial.....106
2.7. PROBLEMAS GENERALES DE LOS ACTUALES SENSORES.....108

CAPITULO III: SISTEMA PARA LA SUPERVISION EN TIEMPO REAL
DEL PROCESO DE MECANIZADO EN UNIDADES DESATENDIDAS.....109

3.1. FUNDAMENTO DEL SENSOR BASICO.....112
3.2. PRIMER PROTOTIPO.....120
3.3. CONFIGURACION DEL SISTEMA DE ENSAYO PRELIMINAR.....124
3.4. SENSOR DE POTENCIA Y CORRIENTE ELECTRICA.....130
3.5. SISTEMA MULTISENSOR COOPERANTE.....138
3.5.1. Sensor de esfuerzos.....138
3.5.2. Sensor de temperatura.....143
3.5.3. Fuente de alimentación del sistema multisensor....147
3.5.4. Otras características del sistema.....147
3.6. SISTEMA AUTOMATIZADO DE ENSAYO Y SUPERVISION DEL
PROCESO.....150
3.6.1. Máquina-herramienta y sistemas de control.....150
3.6.2. Gobierno de los sistemas de control.....154
3.6.3. Módulo electrónico de los sensores.....158

VIII

3.6.4. Instrumentación de medida.....	161
3.6.5. Programas de aplicación.....	166
<u>CAPITULO IV: EXPERIENCIAS Y ANALISIS DE RESULTADOS</u>	<u>171</u>
4.1. <u>ENSAYOS CON EL PRIMER PROTOTIPO PARA EXTENDER LAS</u> <u>APLICACIONES DE LOS SENSORES DE POTENCIA ELECTRICA.....</u>	<u>174</u>
4.2. <u>ENSAYOS PARA DETERMINAR LA SENSIBILIDAD DEL SENSOR</u> <u>Y METODO PROPUESTO.....</u>	<u>179</u>
4.3. <u>SUPERVISION EN TIEMPO REAL DEL PROCESO DE MECANIZADO.....</u>	<u>188</u>
4.4. <u>CONCLUSION.....</u>	<u>204</u>
<u>CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS.....</u>	<u>205</u>
<u>APENDICE 1: TERMINOLOGIA USADA EN LA MEMORIA.....</u>	<u>209</u>
<u>APENDICE 2: PROGRAMAS DE APLICACION.....</u>	<u>215</u>
<u>REFERENCIAS.....</u>	<u>243</u>

INTRODUCCION

INTRODUCCION

I.1 PROBLEMAS ACTUALES EN LA AUTOMATIZACION DE LOS PROCESOS DE MANUFACTURA.

La introducción del Control Numérico (CN) al final de los años cincuenta supuso un importante avance en los procesos de manufactura al reducir considerablemente los tiempos de mecanizado y de preparación de la línea de producción. La posterior incorporación de los ordenadores, al principio de los años setenta, revolucionó la concepción y utilización del Control Numérico. Esta transformación, en sistemas de Control Numérico con computador (CNC), supuso nuevas ventajas: incremento de la flexibilidad, reducción de imprecisiones en el mecanizado, reducción y simplificación de los circuitos electrónicos, disponibilidad de programas de autoverificación y diagnosis, etc.

En la actualidad se tiende a la consecución de unidades de mecanizado desatendido y células de fabricación flexible (CFF). Las primeras son sistemas capaces de trabajar continuamente sin intervención humana, las segundas células de mecanizado automáticas capaces de producir piezas diferentes. En este camino los actuales sistemas CNC presentan múltiples inconvenientes, estando concebidos para un funcionamiento independiente y ser manejados por un operador. Por otra parte, algunos trabajos de manu-

factura requieren destreza, inteligencia y la capacidad de percepción del operador humano.

Los futuros sistemas de Control Numérico deberán incorporar nuevas prestaciones: capacidad de percepción del mundo exterior, posibilidad de comunicación con un ordenador central supervisor, facilidad de adaptación a las características del proceso y en definitiva deberán lograr un nivel de autonomía que no requiera la actuación del hombre.

El Control Adaptativo (CA) está mejorando la productividad y la calidad. La inteligencia artificial resolverá los problemas causados por la incertidumbre inherente al control de las máquinas-herramienta. Sin embargo, el mayor obstáculo en el camino hacia la fabricación integrada por computador (FIC) o, en menor escala, hacia la total operatividad de los sistemas de fabricación flexible (SFF) es que ambos dependen, en última instancia, de la posibilidad de realizar un mecanizado desatendido. Para que este pueda ser llevado a cabo, es preciso desarrollar sensores fiables, que suministren en todo momento un conocimiento suficiente del estado del proceso con el fin de asegurar su eficiencia y ejercer las acciones correctoras convenientes ante cambios imprevisibles, accidentes o roturas.

En la actualidad el tiempo de empleo efectivo de máquina se ve reducido de forma importante debido a los fallos de las herramientas. Por otra parte la duración de éstas es un factor

crítico en el proceso de mecanizado. Con el fin de determinar cuando una herramienta debe ser cambiada, su duración tendría que ser predicha de antemano, pero debido a la variabilidad e incertidumbre de las operaciones de mecanizado los modelos teóricos y empíricos desarrollados resultan inadecuados o conducen a un bajo aprovechamiento del útil.

Es por esta razón, que entre las diversas tareas que deben realizar los referidos sensores, la más crítica, compleja y actualmente mal resuelta es la de estimar el estado de la herramienta a lo largo del proceso de arranque de viruta, constituyendo el principal escollo para llegar al mecanizado desatendido.

I.2.- PROPOSITO DEL PRESENTE ESTUDIO

A la vista de la situación expuesta, nos proponemos con este trabajo alcanzar los objetivos que se definen a continuación.

- Realizar una revisión crítica del estado actual de la tecnología de sensores aplicables al mecanizado sin intervención humana. En consonancia con los principales problemas señalados en el apartado anterior, un punto importante del estudio debe ser el análisis de las posibilidades de dichos sensores para estimar el estado de la herramienta durante el proceso.

Asimismo, nos proponemos justificar previamente la necesidad de usar los sensores para realizar, entre otras, dicha tarea. Ello será llevado a cabo mediante el examen de la validez y condiciones de aplicación de los modelos teóricos y experimentales de predicción de la duración de una herramienta.

- El siguiente objetivo será definir un procedimiento para la supervisión en tiempo real del proceso basado en la observación de múltiples variables y encaminado a su aplicación a una unidad de mecanizado desatendido.

Este procedimiento debe ser capaz de determinar las condiciones generales del mecanizado, así como detectar la presencia de situaciones anómalas.

Nos proponemos, de un modo especial, fijar una metodología que permita estimar el grado de deterioro de la herramienta en todo momento del proceso, sin interrumpirlo ni perturbarlo. El método debe tener además las siguientes cualidades: fiabilidad, universalidad, sencillez y ser de fácil aplicación.

- Concebir, diseñar y realizar unos sensores, con sus correspondientes circuitos electrónicos de acondicionamiento y procesamiento de señal, que permitan evaluar los parámetros del proceso seleccionados.

- Configurar en torno a una máquina-herramienta un sistema que permita, con ayuda de los sensores preparados, la supervisión durante el transcurso del proceso de las condiciones en las que se está realizando, el estado de la herramienta y la detección de eventos imprevistos. Se pretende explotar los datos obtenidos para aplicar el sistema, en el futuro, a una unidad de mecanizado desatendido, operando en lazo cerrado.

I.3.- DESARROLLO

El presente trabajo se ha estructurado en cuatro capítulos. El primero tiene por objeto estudiar la duración de las herramientas, ya que como hemos dicho, el conocimiento del estado del útil durante el proceso de corte es determinante para poder realizar un mecanizado sin intervención humana. Tras una primera reflexión acerca de la dificultad de definir el concepto duración se pasa a estudiar las diferentes formas del desgaste de las herramientas, al ser este el criterio más extendido para determinar su vida. A continuación se estudian los mecanismos que dan lugar al desgaste y por último se enumeran los factores de los que depende la duración de las herramientas.

En el siguiente capítulo se analizan los modelos empíricos y teóricos que han sido desarrollados para predecir la duración de una herramienta en función de las variables del proceso. Del estudio de su utilidad se justifica la necesidad de realizar una supervisión continua del estado de aquella durante el proceso, sirviéndose de sensores que puedan ocuparse también de las restantes tareas propias del mecanizado desatendido. En la segunda parte del capítulo se lleva a cabo una revisión crítica del estado actual de la tecnología de estos sensores y se acaba analizando las dificultades que presentan a la hora de su aplicación industrial.

En el tercer capítulo introducimos una metodología propia para determinar el envejecimiento de la herramienta, que carece de las anteriores dificultades, y describimos el trabajo realizado para poner en práctica la referida metodología. A continuación, el diseño descrito es extendido a un sistema multi-sensor, que permite obtener un conocimiento más completo del proceso con vistas a la consecución de una unidad de mecanizado desatendido. También se explica en detalle la circuitería electrónica de acondicionamiento y preprocesamiento de señal realizada para cada sensor, justificándose las soluciones adoptadas para cada problema.

Finalmente se describe un sistema de supervisión en tiempo real del proceso, configurado para explotar los datos obtenidos de cara a su aplicación en una unidad de mecanizado desatendido y determinar la validez y los límites del método propuesto. En este apartado se dá cuenta de cómo se transformó una máquina-herramienta clásica en una controlada por ordenador, como se configuró un sistema automático de adquisición de datos en tiempo real, como el proceso puede ser visualizado en la pantalla del ordenador mientras este tiene lugar y como opera todo el sistema en conjunto. Nuevamente se justifican todas las soluciones adoptadas. También se comentan en el tercer capítulo los programas de aplicación escritos, y su listado se incluye en el segundo apéndice.

El cuarto capítulo tiene por objeto describir los ensayos realizados y dar a conocer sus resultados. En él se presentan las evidencias obtenidas para extender el campo actual de aplicación de los sensores de potencia eléctrica. Se detalla, asimismo, como la evolución de los parámetros medidos por los sensores señala las distintas situaciones que tienen lugar en el transcurso del proceso y se demuestra la necesidad de usar un sistema multisensorial cooperativo para realizar un mecanizado sin intervención humana.

Expresamente, se muestra como el sensor básico del sistema detecta las distintas etapas de la vida de la herramienta y cómo indica cuando es necesario realizar su cambio porque se ha llegado al final de su vida útil. Todo ello antes de que se produzca un fallo catastrófico.

En el apartado de conclusiones y perspectivas se resumen las aportaciones del presente trabajo. Entre otros resultados cabe destacar la utilidad del sistema multisensor y del método y sensor básico propuestos para realizar la estimación del estado de la herramienta en procesos de mecanizado. Se termina esta parte de la memoria apuntando las líneas del futuro trabajo de investigación.

Los capítulos anteriores se complementan con dos apéndices. En el primero incluimos ilustraciones y definiciones de los términos más comunes del campo en que se realiza este estu-

dio y que han sido utilizados en él. En el segundo adjuntamos los listados de los programas de aplicación desarrollados.

CAPITULO I

DURACION DE LAS HERRAMIENTAS DE CORTE METALICO

DURACION DE LAS HERRAMIENTAS DE CORTE METALICO

El propósito de este primer capítulo es destacar la significación que tiene la duración de la herramienta de corte en los procesos de mecanizado por arranque de viruta y estudiar el fenómeno.

Para realizar esto último, plantearemos en primer lugar la dificultad de definir el concepto y veremos como se resuelve el problema mediante la elección de un criterio entre los varios existentes para determinar la citada duración. Al ser el desgaste de la herramienta el más extendido de ellos describiremos a continuación las diferentes formas en las que aquél se presenta y estudiaremos los mecanismos físico-químicos que lo originan.

Tras indicar como se puede evaluar la vida del útil analizaremos las numerosas variables del mecanizado de las que ésta depende.

1.1. IMPORTANCIA DEL TEMA

La importancia de la duración de las herramientas en el corte de metales proviene de dos factores: la optimización del proceso y los percances ocasionados por su rotura.

En un gran número de mecanizados, los ángulos del útil, las velocidades y los avances se escogen de tal forma que se obtenga una duración económica de la herramienta. Entendiéndose por tal aquella que proporciona características individuales satisfactorias de las operaciones bajo uno o varios de los siguientes criterios: mínimo coste de producción, máxima productividad o máximo beneficio. Por la relación entre velocidad y duración, lo que da lugar a que también se hable de velocidad económica, es necesario elegir entre altos valores de ésta y duraciones breves o velocidades menores con duraciones más prolongadas. Las condiciones para las cuales se obtiene una vida relativamente corta de la herramienta son antieconómicas porque los costos de afilado y tiempo gastado en cambiar la herramienta son comparativamente altos. El uso de velocidades y avances pequeños es igualmente costoso debido a la baja productividad obtenida. En la práctica se elige la condición más económica considerando factores como: costes de las herramientas, costes de sustitución, coste de amortización del tiempo improductivo de máquina, etc.

Por otra parte, el conocimiento de la duración de herramienta es importante para prevenir los daños causados por su rotura, lo que incrementa los costes ya citados con otros nuevos, debido a que el cambio de herramienta debe realizarse posiblemente en el momento más inoportuno y a que en muchas ocasiones la herramienta estropea con su fallo la pieza que se está mecanizando.

El problema se agrava en aquellas ocasiones en las que la rotura de la herramienta o su desgaste excesivo, caso de las costosas herramientas especiales usadas para mecanizar materiales duros empleados en aviación, llevan a aquella al final de su vida al no poderse hacer un nuevo reafilado.

Indiquemos finalmente que la creciente automatización y sofisticación del medio de producción hace que todos los costes citados adquieran un valor considerable.

1.2 DURACION DE LA HERRAMIENTA: DEFINICION Y CRITERIOS PARA SU DETERMINACION.

La duración de una herramienta es un concepto difícil de precisar y en gran medida de naturaleza cualitativa. Usualmente se define como el tiempo transcurrido entre dosafilados sucesivos /1/, /2/, /3/, /4/. Sin embargo, al no haber un criterio único para determinar cuando se debe realizar un nuevo afilado, resultan predicciones de vida diferentes para una misma herramienta y proceso.

Los criterios que pueden utilizarse se refieren a la ocurrencia de un fenómeno o a la superación por una magnitud de un valor prefijado /1/, /2/, /3/, /5/, /6/, /7/, /8/ y son los siguientes:

- Desmoronamiento o fallo catastrófico.
- Variaciones en la geometría de la herramienta debidas a su desgaste.
- Degradación del acabado superficial
- Variación de las fuerzas de corte
- Aumento del consumo de potencia

- Superación de una temperatura máxima

- Pieza fuera de tolerancias.

- Aparición de retemblado o vibraciones.

Entre todos ellos, los frecuentemente adoptados son los dos primeros ya que dependen de observaciones ligadas a la geometría de la herramienta. A continuación se presenta un estudio y discusión de los diferentes criterios.

1.2.1. Desmoronamiento o fallo catastrófico.

Obviamente la situación en la cual la herramienta deja de cortar u origina desperfectos en la pieza que se está fabricando puede servir como criterio para determinar la duración de una herramienta. Su principal inconveniente es que su aparición puede producir graves daños. El criterio tampoco es válido cuando se desea mantener las tolerancias de una pieza usando máquinas automáticas o cuando el acabado superficial es importante. El criterio es aplicable no obstante, en operaciones de desbaste, cortes toscos, máquinas no automáticas, herramientas quebradizas, y condiciones de corte severas.

Aunque el fallo catastrófico puede producirse de forma

abrupta, las condiciones que lo provocan pueden desarrollarse durante un largo periodo de tiempo. De esta manera se habla de fallos preliminares en las herramientas de acero rápido, las cuales antes de su destrucción pueden originar una superficie mecanizada de aspecto brillante y tostado. En otras ocasiones la presencia de una zona dura en la pieza a mecanizar o un mal funcionamiento de la máquina puede dar lugar a un fallo prematuro: rotura, deformación o fuerte desconchamiento.

1.2.2. Variaciones en la geometría de la herramienta debidas a su desgaste.

Las variaciones de la geometría de la herramienta debidas a su desgaste, especialmente en las caras de incidencia y desprendimiento, son el criterio más ampliamente aceptado para determinar la vida de aquella. Ello es debido a que se basa en la cuantificación de parámetros geométricos de la misma herramienta, lo que le confiere un caracter muy universal. Su discusión merece ser hecha en detalle en un epígrafe aparte.

1.2.3. Degradación del acabado superficial.

En operaciones de acabado la rugosidad de la pieza mecanizada puede ser un criterio útil para determinar el deterioro de la herramienta. Aunque en general, no es un criterio de

fácil aplicación al no variar la rugosidad de un modo uniforme con el desgaste.

1.2.4. Otros criterios.

Las fuerzas de corte varían según la herramienta se va deteriorando. Debido a ello, un aumento notable de aquellas es a veces utilizado como criterio de duración, principalmente en trabajos de investigación y Control Adaptativo. La relación entre las fuerzas de corte y el desgaste de la herramienta ha sido investigada por algunos autores /9/, /10/, /11/, /12/, /13/ con objeto de obtener indicaciones continuas, si bien indirectas, del estado de la herramienta.

Igualmente, un embotamiento de la herramienta puede traer consigo un notable aumento de la potencia consumida por los motores de la máquina de forma que puede definirse el fin de la vida de una herramienta cuando la potencia eléctrica rebase un límite prefijado.

Debido a la energía calorífica generada durante el proceso de corte, la temperatura de la herramienta crece, pudiéndose llegar a un valor tal que su dureza disminuya fuertemente y se estropee o desgaste rápidamente. Por esta razón otro criterio que puede indicar cuando debe realizarse un cambio de herramienta es el basado en la superación de una temperatura crítica.

Como se ve, el problema de la duración de la herramienta es complicado y no hay un único y claro camino de abordarlo. Algunos autores prefieren seleccionar un criterio y definir la duración de la herramienta como el tiempo de corte requerido para alcanzar dicho criterio /5/. Así, en las normas ISO 3685 /7/ y UNE 16-148 /6/ se dan las siguientes definiciones:

- Desgaste de la herramienta: La modificación de la geometría de corte de la herramienta con relación a su geometría original durante el corte, debida a la pérdida progresiva del material de la herramienta.
- Medida del desgaste de la herramienta: Una dimensión a medir para indicar el valor del desgaste.
- Criterio de duración de la herramienta: Un valor límite preestablecido en la medida del desgaste de la herramienta o la aparición de determinado fenómeno o circunstancia .
- Duración de la herramienta: El tiempo de corte necesario para alcanzar un criterio de duración de la herramienta.

Los criterios recomendados en dichas normas son clasificados según el tipo de herramienta usada: acero rápido, metal

duro o cerámica, y son valores de la franja de desgaste de la cara de incidencia, valores de la profundidad del cráter de cara de desprendimiento y la ocurrencia del fallo catastrófico. Para operaciones de acabado en torno se recomienda un valor máximo de rugosidad superficial.

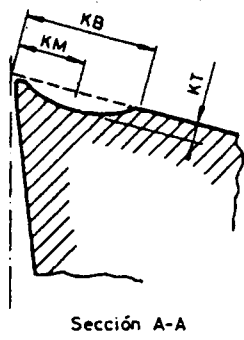
1.3. DESGASTE DE LAS HERRAMIENTAS.

Durante el corte de metal la herramienta está sometida a fenómenos mecánicos, térmicos y químicos que originan en ella una pérdida de masa (desgaste), por interacción con la pieza y la viruta. Este desgaste es un fenómeno inherente al proceso de corte y si este se realiza correctamente, no debe ser motivo de preocupación, hasta que alcanza el valor en el que la herramienta debe cambiarse. Si se producen roturas anormales o un desgaste excesivamente rápido la herramienta no está trabajando correctamente, por lo que debe remediarse esta situación cambiando una o más variables del proceso.

Como ya fue apuntado, el desgaste de la herramienta es el criterio más habitual para determinar su duración; por esta razón ha sido necesario estudiar y definir las características de las partes desgastadas de la herramienta. Tanto la naturaleza como la forma del desgaste dependen de la operación realizada.

A continuación, estudiaremos en detalle las zonas de desgaste de las herramientas para torno, por haber sido esta la máquina-herramienta utilizada en la parte experimental del presente trabajo. Véanse las figuras 1.1 a 1.3.

1.3.1. Desgaste de la cara de incidencia principal.



Sección A-A

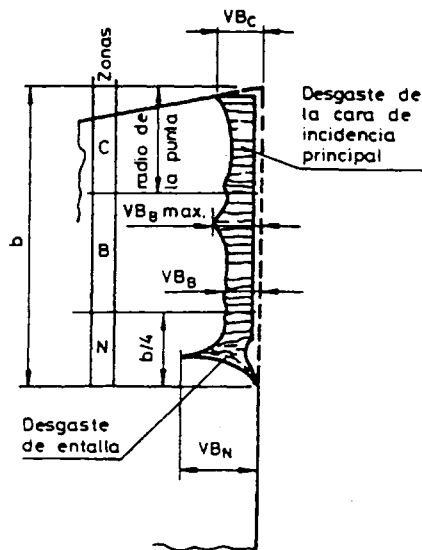
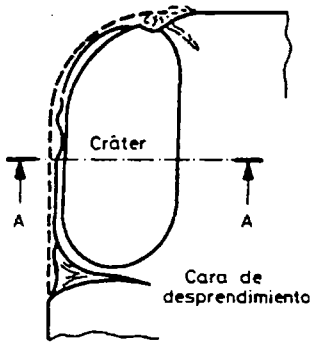


Fig.1.1 Tipos de desgaste de las herramientas del torno

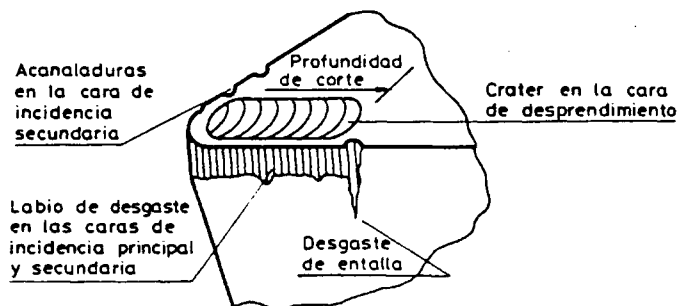


Fig.1.2 Aspecto de los desgastes sufridos por una típica herramienta de torno

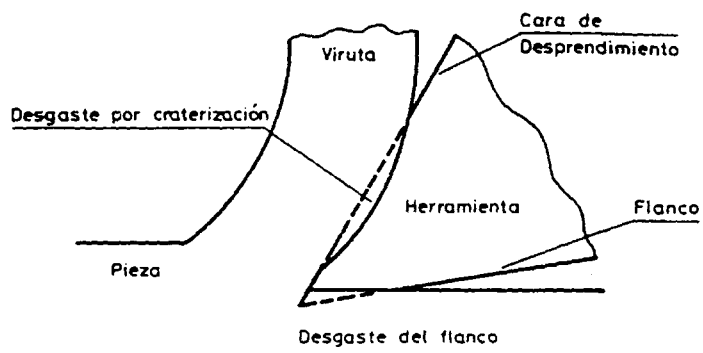


Fig.13 Principales zonas de desgaste

Es el desgaste que se produce en el flanco de la herramienta, por debajo del filo de corte. Es originado por la fricción entre la superficie recién producida en la pieza y el área de la cara de incidencia en contacto con ella. Debido a la rigidez de la pieza es paralelo a la dirección del corte. Su aspecto es el de una franja, de anchura uniforme la mayor parte de las veces.

Cuando la profundidad de corte es desigual, como ocurre al torneear una pieza excéntrica, el labio de desgaste se agranda hacia la punta de la herramienta. Esta forma de desgaste también puede indicar la aparición de un cráter cerca de la punta, o una rotura en esta zona. En herramientas de carburo puede ser signo de deformaciones del filo de corte en este extremo de la herramienta.

En ocasiones, se desprenden del filo de corte finas partículas que aceleran el desgaste de la herramienta, aunque no originan necesariamente su inmediata rotura. Este fenómeno, conocido como desconchado, puede reconocerse por el aspecto de la arista de corte principal y el labio de desgaste del flanco. Una depresión profunda en la parte inferior de la franja es síntoma de haberse producido un desconchado, y si este borde tiene una apariencia mellada, es que el desconchado ha sido fuerte. Esta depresión puede no ser única. Con frecuencia, la grieta que se produce en el filo de corte, se encuentra rellena de material de

la pieza soldado a la herramienta. Esto tiene lugar cuando el desconchado se forma como consecuencia del filo recrecido. El efecto del desconchado es disminuir la vida de la herramienta, al hacer crecer el labio de desgaste.

A veces se presenta una profunda hendidura a la altura de la línea que marca la profundidad de corte, es decir en la zona donde la arista de corte principal alcanza la superficie a mecanizar. Este fenómeno se conoce como desgaste en forma de entalla. Puede ser originado por una costra dura en la superficie de la pieza, por una capa superficial endurecida, o por la mecanización de aleaciones a alta temperatura /8/. Albrecht /14/ investigó los factores que influyen en la formación de la entalla, señalando las causas que provocan el flujo del filo recrecido desde la zona de altas presiones de la punta de la herramienta hacia el lado exterior, de baja presión, entre la cara de incidencia principal y la pieza.

El perfil y la longitud de esta garganta depende en gran parte de la precisión del reglaje de la profundidad. Algunos investigadores /15/ sugirieron no tenerla en cuenta para fijar criterios de duración de la herramienta; salvo que este desgaste sea predominante sobre el resto /6/.

Cuando se usa por primera vez una herramienta afilada se produce inicialmente un desportillamiento rápido del filo de corte. Acto seguido el desgaste de flanco progresa más lentamente

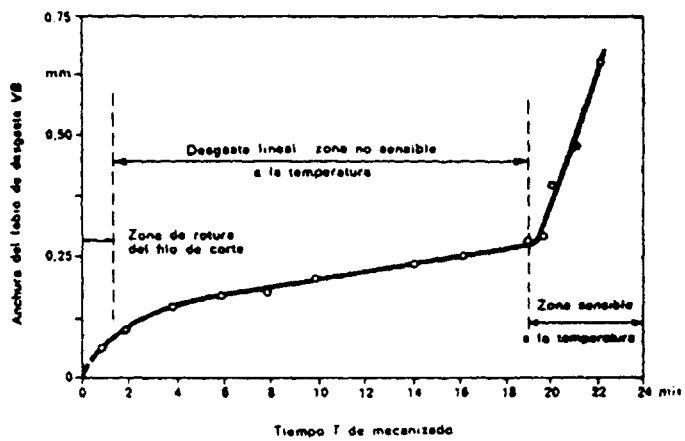


FIG-1.4: Evolución del desgaste de la cara de incidencia.

y de forma lineal hasta alcanzar un tamaño crítico a partir del cual la herramienta se deteriora rápidamente. En la figura 1.4 se muestran los tres estados indicados: zona de rotura del filo de corte, zona de desgaste lineal, poco sensible a la temperatura y zona sensible a la temperatura.

El desgaste de las herramientas de acero rápido evoluciona de forma diferente al de las herramientas de metal duro, pudiendo darse prolongados periodos con un crecimiento de desgaste apenas medible, especialmente con bajas velocidades de corte mecanizando materiales dúctiles.

Las figuras 1.5 y 1.6 muestran respectivamente la progresión del desgaste de flanco para distintos materiales de trabajo y velocidades, según Micheletti /1/ y Takeyama et al. /16/.

Varios investigadores /17/, /18/ y /19/ concluyeron que el desgaste VB de la cara de incidencia principal venía dado por las ecuaciones :

$$L = k * VB \quad (1.1)$$

$$L = k * VB^2 \quad (1.2)$$

siendo:

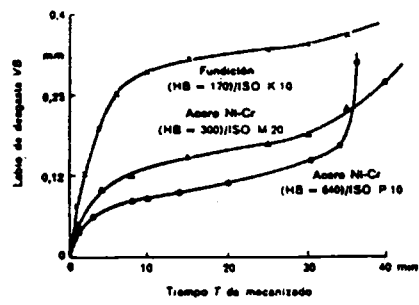


Fig. 1-5: Variación del labio de desgaste con el tiempo para distintos materiales y herramientas.

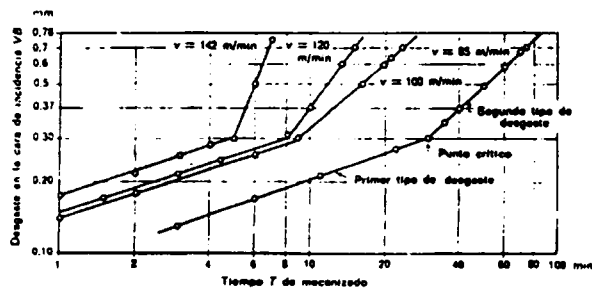


Fig. 1-6: Desgaste en la cara de incidencia en función del tiempo para distintas velocidades.

VB la anchura de la franja de desgaste,

L el espacio recorrido por la herramienta y

k una constante que depende del material, las condiciones de corte y la geometría de las herramientas.

De sus trabajos pueden explicarse las razones de la presencia del punto crítico a partir del cual el desgaste se acelera, basándose en un aumento de la fuerza sobre la cara de incidencia cuando VB aumenta, y concluir que si las condiciones de corte y el material a mecanizar permanecen invariables el punto crítico dependerá de las dimensiones de VB y no de pequeñas variaciones en la composición de la herramienta. Extremo que fue confirmado por los trabajos de Takeyama /16/, quien concluyó que el punto crítico no depende de la velocidad de corte sino del material a mecanizar (figura 1.6).

Trigger y Chao /20/ y /21/ mostraron como la temperatura en la superficie de contacto herramienta-pieza en la cara de incidencia principal aumentaba según el corte progresaba, y con él VB aumentaba. También observaron que la distribución de temperatura no era uniforme, tomando sus valores mas altos en la parte inferior del labio de desgaste.

Otros estudios han puesto de manifiesto que la temperatura media de corte disminuye al principio hasta un determinado

valor de VB, dependiente del conjunto herramienta-pieza, para volver a subir nuevamente /22/.

Boothroyd et al. /23/ investigaron experimentalmente el efecto del desgaste de flanco en la temperatura generada durante el corte, utilizando herramientas artificialmente desgastadas y técnicas de fotografía infrarroja. Reduciendo su estudio al caso de viruta continua, no existencia de filo recrecido, desgaste de flanco y corte ortogonal corroboraron los trabajos, mas arriba citados, de Trigger y Chao /20/, /21/ acerca del incremento de la temperatura en la franja de desgaste conforme este aumentaba. También concluyeron que:

- 1) la temperatura media sobre la completa superficie de rozamiento de la herramienta, esto es las caras de contacto con la viruta y la pieza, aumentaba cuando la longitud del desgaste de flanco lo hacía;
- 2) aproximadamente el 60% del calor generado en la interfase herramienta-material de trabajo es conducido por la pieza y el restante por la viruta lo que origina un incremento de la temperatura en la cara de desprendimiento de la herramienta ;
- 3) las fuerzas medias de fricción y normal a la cara de incidencia y el coeficiente de rozamiento no dependen de la anchura de la franja de desgaste.

1.3.2. Desgaste de la cara de desprendimiento.

El fenómeno de desgaste que tiene lugar en esta cara se llama craterización. porque se presenta como un profundo cráter situado a corta distancia y por detrás del filo de corte, dejando entremedias una estrecha franja de herramienta sin desgastar. Esta franja puede estar cubierta por el filo recrecido . Para un proceso de corte correcto el cráter aumenta progresivamente de tamaño, hasta que produce la rotura del filo de corte. Cosa que suele ocurrir detrás de la punta de la herramienta. Cuando esto sucede, el desgaste de flanco en la punta aumenta rápidamente y no tarda en producirse una rotura de toda la herramienta.

El cráter se forma especialmente en los mecanizados a alta velocidad con carburos metálicos por efectos de adhesión y difusión. Por esta razón la profundidad del cráter, que suele expresarse como KT , es utilizada como una medida del desgaste de estos tipos de herramientas, y un valor máximo predeterminado como criterio de duración.

La medida del cráter requiere conocer tres dimensiones: longitud KB , posición de la profundidad máxima KM y profundidad KT (ver figura 1.1). La posición del cráter es importante. Un cráter ancho y profundo, pero alejado del filo de corte es menos probable que provoque una rotura de la herramienta que otro menos

ancho y profundo pero más próximo al filo. Por esta razón en las normas ISO y UNE ya mencionadas /7/,/6/ se fijan los valores de KT como criterio de duración de la herramienta con relación al avance. Sin embargo, como KM no depende exclusivamente del avance sino también del material de la herramienta a veces se usa la relación $K = KT / KM$ como criterio.

Según Eugene /24/ el cráter se forma por la acción de la viruta y el filo recrecido. En las figuras 1.7 y 1.8 se muestran los resultados de Trigger y Chao /25/ del crecimiento del cráter, en volumen, con respecto al tiempo y para varias velocidades y la velocidad de desgaste del cráter, craterización, en función de la temperatura media en la superficie de contacto herramienta-viruta. La velocidad de desgaste presenta un crecimiento exponencial a partir de una temperatura lo suficientemente elevada como para que tenga lugar el fenómeno de difusión.

1.3.3. Desgaste de la cara de incidencia secundaria y de la punta

En el torneado de acabado, donde se usan avances pequeños, se presenta a menudo un desgaste en la punta de la herramienta, como una continuación del desgaste de flanco, y en el extremo de la cara de incidencia secundaria una o varias acanaladuras, estando separadas entre sí, en el caso de haber varias, la distancia correspondiente al avance con que se trabaje (véase figura 1.9). Estas muescas provocan un crecimiento de la rugosi-

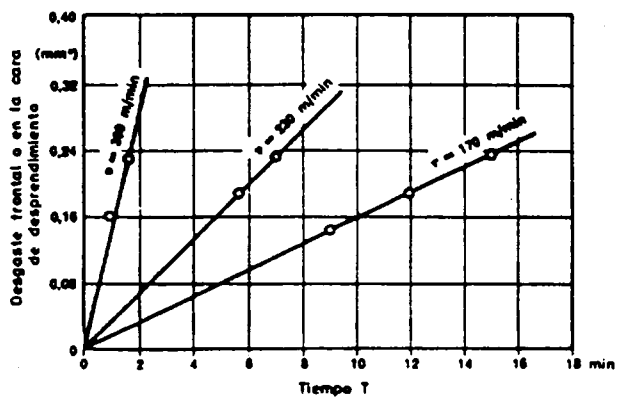


FIG.1-7: Relación entre el desgaste de cráter y el tiempo de mecanizado.

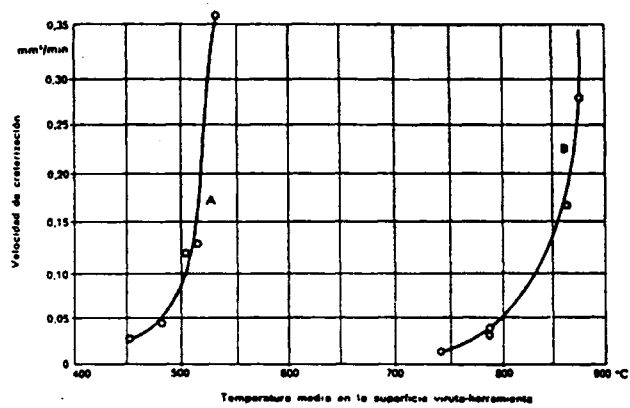


FIG. 1-8: Influencia de la velocidad de caracterización sobre la temperatura media en la superficie herramienta-viruta.

dad de la superficie mecanizada, conforme aumentan de tamaño. De aquí que, al ser este desgaste difícil de evaluar, se use un cierto valor de la rugosidad superficial como criterio de duración de herramienta en torneados de acabado.

Otros fenómenos que pueden ocurrir trabajando bajo severas condiciones de corte son :

- en herramientas de metal duro, la oxidación de la cara de incidencia secundaria, lo que puede conducir a la destrucción rápida de la herramienta.
- la deformación de la punta, lo que dará lugar a una aparición mas rápida del fallo catastrófico en aceros rápidos, y que las consecuencias de la oxidación de las herramientas de metal duro, antes mencionada, sean más graves.



FIG. 1-9: Desgaste en la cara de incidencia secundaria.

1.4 MECANISMOS DEL DESGASTE.

La naturaleza del mecanismo de desgaste depende de la operación de corte que se realice. Según sea esta, puede ser uno u otro el factor predominante. Los fenómenos implicados en el desgaste son :

- Abrasión,
- Adhesión,
- Difusión y
- Acción química y electrolítica.

1.4.1 Abrasión.

El desgaste por abrasión tiene lugar cuando partículas más duras del material que se mecaniza o del filo recrecido pasan sobre las caras de la herramienta y la desgastan por fricción. Estas partículas pueden ser fragmentos de un filo recrecido inestable y endurecidos por deformación, fragmentos endurecidos del material de la herramienta y removidos por el desgaste de adhesión, o elementos duros del material trabajado.

Este tipo de desgaste es predominante en el caso de

elevadas velocidades de deformación del material. Su acción puede ejercerse tanto en la cara de incidencia, por la fricción entre herramienta y pieza, como en la cara de desprendimiento, debido a las razones apuntadas en el párrafo anterior. No obstante, Loladze /26/ hizo observar que el rayado sobre la cara de desprendimiento podía no ser paralelo a la dirección del flujo de la viruta, por lo que este desgaste estaría originado por otras causas.

1.4.2 Adhesión

En el proceso de corte, debido a las presiones que actúan sobre la superficie límite entre herramienta y pieza, se produce en dicha superficie una aleación de los dos materiales en contacto, con una atracción molecular mayor a la que cada átomo tenía con los de su propio material. Por esta razón un intento de separar ambas superficies, ya sea por la fluencia de la viruta, por la colisión de virutas desprendidas o por la superficie recién creada en la pieza, originará roturas y arranques del interior de uno de los materiales. Las deposiciones soldadas resultan a menudo visibles en el filo de corte o en el cráter.

El análisis teórico de este mecanismo fue realizado por diversos investigadores. Dawihl /27/, /28/ y /29/ apuntó que la adhesión se daba a una determinada temperatura. Trent /30/, /31/ supuso la formación de una capa de aleación, que al ser arrancada por la viruta fluyente producía el desgaste de la herramienta.

Holm /32/ construyó una teoría basada en la probabilidad de que un átomo pueda ser arrancado de su superficie al suponer que las superficies recién formadas en el corte jamás son perfectamente lisas y que el contacto entre las superficies deslizantes tenía lugar en puntos discretos. Trigger y Chao /25/ sugirieron un modelo simplificado de desgaste en la cara de desprendimiento a partir de su relación, anteriormente mencionada, entre la profundidad del cráter y la temperatura media en la superficie de contacto. Otro estudio sobre el desgaste en la misma cara fue llevado a cabo por Loladze /26/ que demostró que la cantidad de material transferido de una superficie a otra da lugar a una fusión bastante compleja, y dedujo la siguiente expresión para la vida de la herramienta:

$$v * T = \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^Z \quad (1.3)$$

,siendo H1 y H2 las durezas respectivas de la herramienta durante el corte y de la capa de contacto, v es la velocidad de corte, T es la duración de la herramienta y Z es una constante que depende del material y la herramienta.

1.4.3. Difusión.

Otro fenómeno que tiene lugar durante el mecanizado es

la difusión. Consiste en la migración de átomos de una red cristalina de alta concentración atómica a otra de concentración menor. Este proceso es activado por la temperatura y crece exponencialmente con ella. También depende de la duración del contacto, y la afinidad de ambos materiales.

En el proceso de corte metálico, en el que existe un fuerte contacto entre la herramienta y la pieza, la abrasión y el proceso mecánico ligado a la adhesión generan un aumento de la temperatura en la zona de contacto, lo que permite que la difusión tenga lugar, y con ella un debilitamiento de la estructura superficial de la herramienta, tanto por el empobrecimiento de la herramienta como por la difusión del hierro de la pieza en ella. El fenómeno es complejo y los elementos de la herramienta se difunden en la viruta con distinta intensidad, siendo el tungsteno el que provoca los mayores daños.

1.4.4 Acción química y electrolítica.

Las reacciones químicas entre la herramienta y la pieza, favorecidas por los líquidos de corte, o las que tienen lugar entre aquella y los elementos activos de los últimos aceleran el desgaste. También contribuyen a él : el desgaste electrolítico debido a la corrosión galvánica entre pieza y herramienta, las grietas formadas en las proximidades del filo de corte, debidas a fuertes gradientes térmicos, y la oxidación del metal calentado

en las proximidades del filo.

1.5. DETERMINACION DE LA VIDA DE LA HERRAMIENTA.

La vida de la herramienta puede ser expresada según el carácter de la operación de mecanizado, en distintas unidades, como son:

- el tiempo efectivo de mecanizado,
- el volumen de material arrancado,
- el trabajo hecho,
- la velocidad a la cual el filo tendría una determinada duración en unas condiciones de mecanizado preestablecidas, llamada velocidad de corte equivalente, o
- la velocidad para la cual una herramienta tendría la misma duración cortando un material patrón, a igualdad de las restantes condiciones, llamada velocidad de corte relativa o maquinabilidad relativa.

La medida de la vida de las herramientas exige pruebas largas, delicadas y costosas. Los ensayos realizados para determinarla son de dos tipos :

- ensayos de larga duración, y

- ensayos de duración acelerada.

En los primeros se realiza un mecanizado normal hasta el final de la vida útil de la herramienta. Algunos de estos ensayos se encuentran normalizados /6/, /7/. En los segundos, o bien se detiene el mecanizado antes, o se llega al final de la vida de la herramienta realizando un mecanizado severo; por ejemplo variando la velocidad de corte durante el ensayo o eligiendo un valor muy elevado de ella.

1.6 FACTORES DE LOS QUE DEPENDE LA VIDA DE LAS HERRAMIENTAS.

En un proceso de mecanizado hay muchas variables involucradas. Con Shaw /33/ (ver figura 1.10) podemos considerarlo como un sistema, la máquina-herramienta, con unas entradas (variables externas independientes), unas variables internas (variables dependientes) y unas salidas (piezas producidas). La duración de la herramienta depende de la máquina utilizada y de las variables externas :

- Velocidad de corte,
- Avance,
- Profundidad
- Material de trabajo,
- Material de la herramienta,
- Geometría de la herramienta y
- Uso de fluidos de corte.

En la práctica las variables externas son a su vez algo interdependientes. Las cuatro o cinco últimas suelen quedar bas-

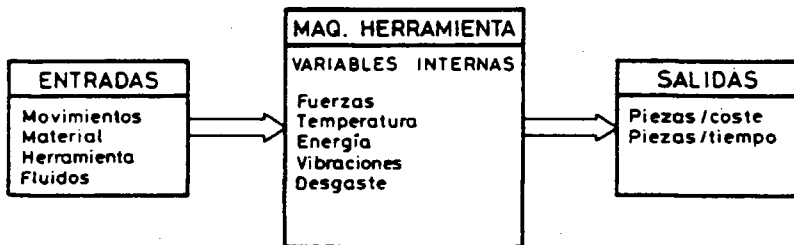


Fig.1.10 El sistema de mecanizado

tante determinadas por el producto que se desea obtener, la máquina disponible, o algún otro factor externo. La elección entonces de los valores para las primeras puede hacerse libremente, dentro de unos rangos. De hecho, la velocidad, el avance y la profundidad de pasada pueden variarse durante el proceso, gracias a los grados de libertad que la máquina proporciona a la herramienta respecto de la pieza. Ello se debe a la característica común de estas tres magnitudes: su variación esta ligada a algún tipo de movimiento . Con ellas se puede controlar tanto la geometría del producto como la cantidad de material arrancado en la unidad de tiempo.

La singularidad de estas tres variables ha conducido a realizar estudios de duración particulares para ellas, los más importantes de los cuales serán revisados mas adelante. Adelantemos, no obstante, que la duración está más influenciada por la velocidad de corte que por el avance y mucho menos por la profundidad, y mencionemos los trabajos de Trent sobre :

- 1) el efecto de la velocidad y el avance sobre el crecimiento del cráter y la formación del filo recrecido, y
- 2) el efecto de este sobre la duración de la herramienta.

En el proceso de corte el aumento en la velocidad o en el avance da lugar a un aumento de la temperatura en la superficie de contacto. A velocidades bajas este aumento de temperatura

tiende a reducir la fricción entre la herramienta y la viruta fluyente y a crear un depósito del material mecanizado, llamado filo recrecido, sobre la arista de corte. A velocidades altas el aumento de temperatura tiende a aumentar la velocidad de crecimiento del cráter.

Las figuras 1.11 y 1.12 muestran para dos herramientas con distinta composición los rangos de velocidad y avance en donde :

- 1) se forma el filo recrecido,
- 2) comienza a crearse el cráter, y
- 3) este progresa rápidamente /34/,/2/.

El filo recrecido puede afectar al desgaste en dos maneras totalmente opuestas :

- Si es inestable, se desprenden de él fragmentos endurecidos que son arrastrados por la viruta y la superficie de la pieza recién formada con lo que aumentan el desgaste de la herramienta por abrasión .
- Si es estable, como cuando se mecanizan materiales duros como la fundición, protege el filo de corte y el mismo cumple su función. Sin embargo, empleando herra-

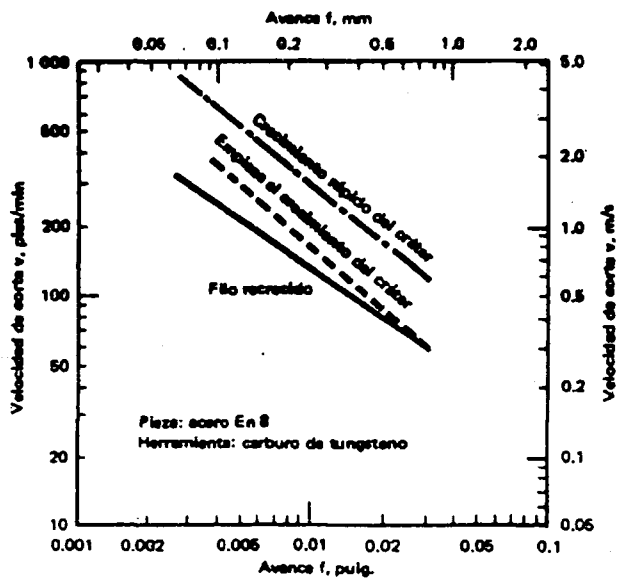


FIG. 1-11: Efectos de la velocidad y el avance en la duración de una herramienta de carburo de tungsteno.

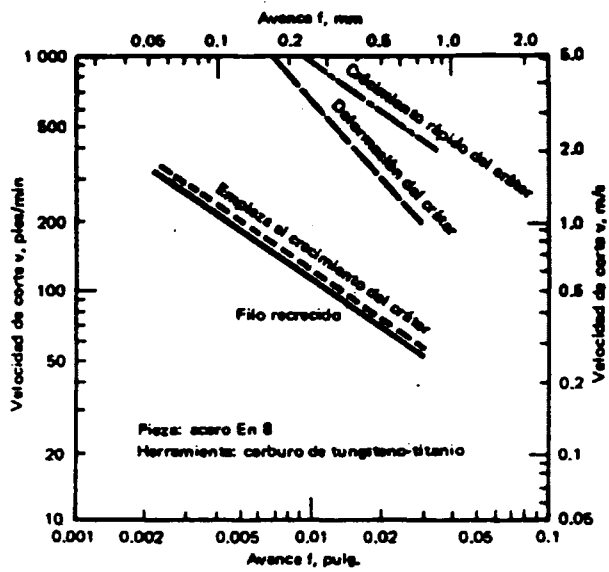


FIG. 1-12: Efectos de la velocidad y el avance en la duración de una herramienta de carburo de tungsteno-titánio.

mientas de metal duro un corte interrumpido bruscamente puede desprender parte del filo recrocado y con él fragmentos de la herramienta . También se pueden producir fisuras en esta durante el enfriamiento, causadas por un distinto coeficiente de dilatación lineal entre el acero y el carburo /34/.

Veamos a continuación el efecto de otros factores en la duración de la herramienta .

La experiencia demuestra que en general los metales más duros son más difíciles de cortar que los más blandos. La dureza es por tanto una propiedad muy importante cuando se va a mecanizar un metal. Sin embargo, el factor más importante en relación a la facilidad con que el material puede cortarse es la microestructura del mismo, seguida de las deformaciones plásticas que pueden haberse producido en el metal, y que aumentan su dureza.

Obviamente la composición y estructura de la herramienta determinan su duración cuando el resto de las condiciones son fijas. Los materiales actualmente usados, por orden creciente de resistencia al desgaste son :

- Aceros al carbono y especiales ,

- Aceros rápidos y super rápidos ,

- Aleaciones duras no ferrosas (estelitas),
- Carburos metálicos (metal duro),
- Carburos metálicos especiales (grano micrométrico y "fundidos"),
- Carburos metálicos recubiertos ,
- Materiales cerámicos,
- Nitruro de boro cúbico,
- Diamantes naturales, y
- Diamantes sinterizados policristalinos.

Un aumento del ángulo de desprendimiento conduce en principio a un mejoramiento de las condiciones del corte y por tanto a un aumento de la vida de la herramienta. Sin embargo, cuando el ángulo de inclinación es grande, el filo se debilita y resulta una duración menor de la herramienta. Para un conjunto fijo de condiciones de corte, existe un valor óptimo del ángulo de desprendimiento que proporciona la mayor duración de la herramienta /35/. La experiencia ha mostrado que el ángulo óptimo es aproximadamente constante para unos materiales y herramienta dados (vease la figura 1.13).

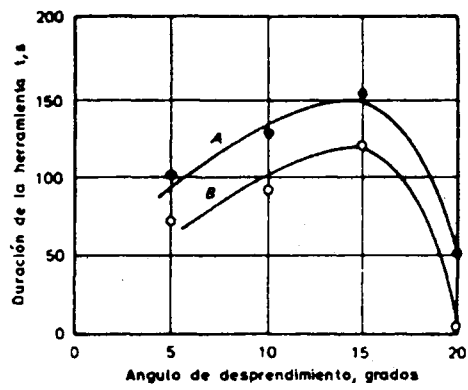


FIG. 1-13: Efecto del ángulo de desprendimiento en la duración de la herramienta.

El mismo efecto tiene lugar para el ángulo de incidencia, ángulo que forma la dirección de corte con la cara de incidencia principal. Para pequeños valores del ángulo de inclinación un aumento suyo reduce el desgaste por unidad de tiempo. En la práctica este aumento no puede hacerse muy grande sin debilitar la herramienta. El ángulo óptimo para aceros rápidos se sitúa en torno a los 8 grados para la mayoría de los materiales de trabajo, y en torno a los 5 grados para los carburos.

Numerosos investigadores han estudiado el efecto de los fluidos de corte, desde que Taylor los utilizara por primera vez hacia 1890 /36/, /37/, /38/, /39/. Las funciones que cumplen son:

- Refrigeración,
- Lubricación,
- Prevención de soldadura entre viruta y herramienta,
- Separación de la viruta ya arrancada de la pieza,
- Protección contra la corrosión, y
- Lubricación de la máquina.

La acción como refrigerante proporciona un aumento de

la vida de la herramienta al reducir la temperatura en la zona del filo. La acción lubricante reduce la fricción en la cara de la herramienta, y reduce la ocurrencia del filo recrecido, con el consiguiente aumento de la vida de la herramienta. También contribuye a ello la prevención de la soldadura entre la viruta y la herramienta, que se puede presentar por el efecto de la fuerte compresión y calentamiento entre ellas.

CAPITULO II

PREDICION DE LA VIDA DE LA HERRAMIENTA Y SUPERVISION DE SU ESTADO EN EL PROCESO DE CORTE

PREDICCIÓN DE LA VIDA DE LA HERRAMIENTA Y SUPERVISIÓN
DE SU ESTADO EN EL PROCESO DE CORTE

Hemos justificado en el capítulo anterior la importancia de la duración de la herramienta por razones de optimización del mecanizado y para prevenir su fallo. Para que estas ideas puedan ser bien aprovechadas sería preciso conocer con suficiente exactitud el tiempo en que una herramienta va a poder ser utilizada en unas condiciones determinadas de mecanizado. En este capítulo serán estudiados los modelos y esfuerzos que han sido realizados en orden a conseguir esto.

Desafortunadamente las operaciones de mecanizado están afectadas por un gran número de incertidumbres por lo que las predicciones de la duración de la herramienta realizadas no resultan útiles en la práctica. La solución debe buscarse en el marco más amplio de la supervisión global del proceso mientras éste tiene lugar.

En la segunda parte del presente capítulo revisaremos los sensores que hasta el momento han sido desarrollados para realizar esta supervisión, explicando su fundamento y señalando sus limitaciones. Haremos hincapié en sus posibilidades para estimar la duración de la herramienta, no sólo por ser éste el objeto principal de esta memoria, sino porque es actualmente el cuello de botella para la realización de una adecuada supervisión

y control del proceso.

A la vista de los resultados del anterior análisis y dado que en las actuales líneas automatizadas de producción el cambio sistemático de las herramientas está mal adaptado, justificaremos la necesidad de disponer de un sensor, con unas características muy estrictas, que suministre una buena información del estado de la herramienta durante el proceso sin dificultarlo o interrumpirlo. La utilización de un sensor de este tipo es indispensable igualmente si se desea realizar un buen Control Adaptativo.

2.1 MODELOS DE PREDICCIÓN BASADOS EN LARGAS SERIES DE ENSAYOS

Taylor, desde 1881 a 1907, y Kronenberg, desde 1935 a 1965, realizaron largas series de ensayos conducentes a determinar la vida de las herramientas a partir de parámetros externos del mecanizado. Las leyes que formularon siguen siendo hoy en día de gran validez, a pesar de los estudios más profundos que las sucedieron. En este apartado revisaremos dichas leyes.

2.1.1 Ecuación de Taylor.

En 1907, tras 26 años de metódicas experiencias F. W. Taylor publicó su famoso estudio sobre el corte de metales /45/. Los resultados de sus ensayos dieron lugar a la ecuación que lleva su nombre:

$$v * T^n = C \quad (2.1)$$

donde:

v es la velocidad de corte

T es la duración de la herramienta

n es una constante que depende del material de la herramienta

C es una constante que expresa la velocidad de corte correspondiente a una duración unidad.

El criterio usado por Taylor fue el de "caída" de la herramienta, o momento en el que se incrementan las fuerzas de corte, aparecen vibraciones entre pieza y herramienta, se empeora el acabado superficial, etc.

El valor de la constante C depende de la geometría y material de la herramienta, el material de la pieza, el desgaste máximo admitido, la anchura del corte b , el espesor de la viruta h (figura 2.1) y el tipo de mecanizado.

El efecto del material de la herramienta está también incluido en el exponente n , y su significado físico puede verse a partir de la ecuación (2.1): eligiendo dos pares de valores v - T correspondientes a dos mecanizados iguales realizados con la misma herramienta y material y eliminando C en dicha ecuación se tiene:

$$\left(\frac{T_2}{T_1} \right)^n = \frac{v_1}{v_2} \quad (2.2)$$

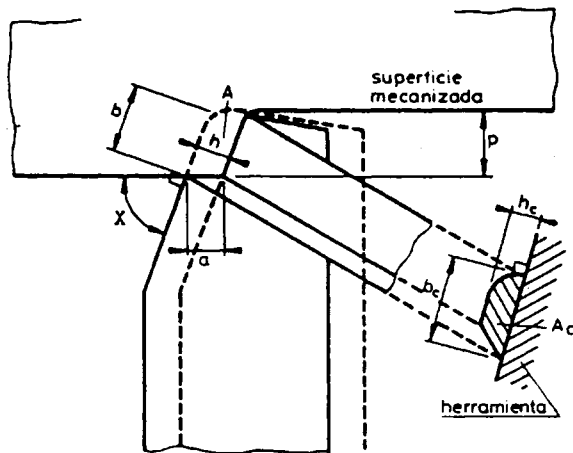


Fig. 2.1 Torneado cilíndrico

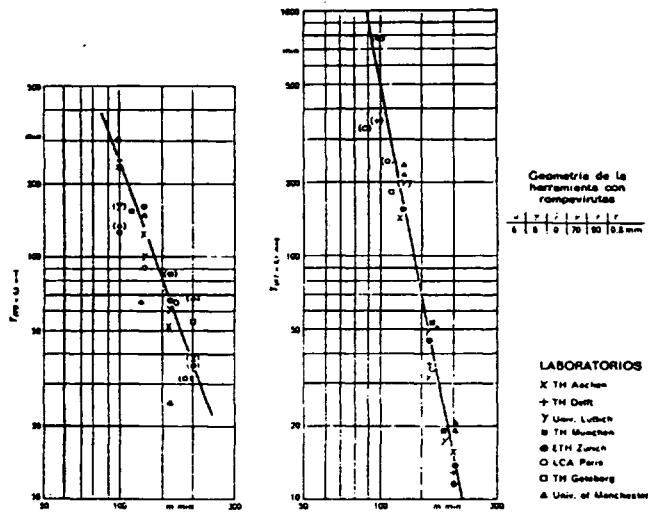


FIG. 2-2: Duración de una herramienta en función de la velocidad de corte.

o bien:

$$n = \frac{\log v_2 - \log v_1}{\log T_2 - \log T_1} = \frac{\Delta \log v}{\Delta \log T} \quad (2.3)$$

Para un mismo mecanizado, material y herramienta n representa el opuesto de la variación del logaritmo de la velocidad de corte con respecto al logaritmo de la duración de la herramienta. En otras palabras n indica la sensibilidad de la duración de la herramienta con la velocidad. Las ecuaciones anteriores indican que hay que optar por una solución de compromiso entre altas velocidades de corte y duraciones breves, o velocidades menores y duraciones más prolongadas. El valor típico de n oscila entre 0.15 para aceros rápidos a 0.70 para las cerámicas, pasando por 0.30 para el metal duro.

La ecuación de Taylor es válida para mecanizados de aceros y aleaciones con bajo porcentaje de carbono, con cualquier material de herramienta, para debates y semiacabados y para duraciones de herramientas entre 10 y 50 minutos /46/. Debido a la aparición de no linealidad no parece válida en las siguientes situaciones:

- mecanizado de materiales de alta resistencia y refractarios con cualquier tipo de herramienta,
- mecanizados en condiciones que lleven a duraciones mayores de las indicadas ,
- mecanizados con fuertes valores de arranque de viruta,
y
- acabados en torno en determinadas condiciones .

2.1.2 Ecuación de Taylor generalizada.

Estudios posteriores /47/, /48/ revisados por Barrow /49/ y Micheletti /1/ permiten evaluar analíticamente los factores de influencia sobre la constante C que no habían sido tenidos en cuenta por Taylor.

2.1.2.1 Efecto del desgaste.

Al venir la duración de la herramienta determinada por el desgaste sufrido , es evidente que la velocidad admitida para una cierta duración de la herramienta, depende esencialmente del desgaste tolerado según una ley exponencial del tipo :

$$v = K_1 \cdot VB^m \quad (2.4)$$

permaneciendo fijos los restantes parámetros.

Como criterio de duración se elige el desgaste VB debido a que la experiencia han demostrado que él es el principal factor que determina la duración de la herramienta.

2.1.2.2. Influencia del espesor de la viruta.

En la fig 2.3 se puede ver la relación entre el espesor de la viruta y la velocidad, para un cierto valor de VB y permaneciendo fijas las restantes variables. En ella se ven dos curvas correspondientes a un mecanizado de desbaste (viruta gruesa) y a otro de acabado (viruta fina). La ley seguida corresponde a la ecuación:

$$v = \frac{K_2}{h^x} \quad (2.5)$$

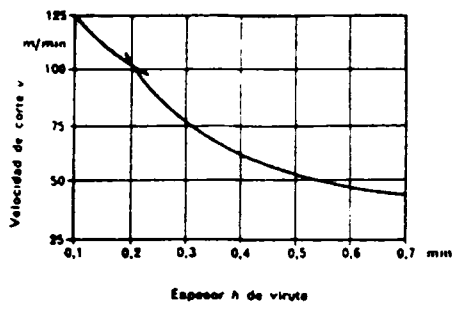


FIG. 2-3: Relación entre el espesor de viruta y la velocidad de corte.

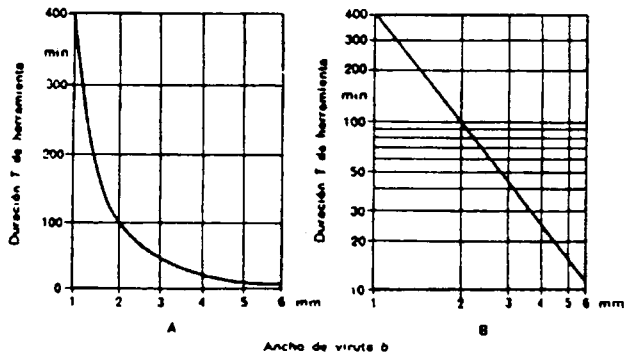


FIG. 2-4: Relación entre duración de herramienta y ancho de viruta.

2.1.2.3 Efecto del ancho de la viruta.

Ensayos de duración de la herramienta en función del ancho de la viruta (figura 2.4), permaneciendo fijos v , VB y h , o de velocidad en función asimismo del ancho de la viruta, para un determinado valor del desgaste y siendo h fijo, permiten escribir:

$$v = \frac{K_3}{b^y} \quad (2.6)$$

La disminución de vida, al aumentar b , es menos notoria que al aumentar h porque ahora la temperatura crece en menor proporción que en el caso anterior. Una viruta ancha y de pequeño espesor produce una temperatura local más baja que otra de la misma sección pero de mayor espesor por existir una mayor superficie de contacto.

La influencia de los tres factores estudiados, sobre la constante C , puede entonces expresarse mediante la siguiente relación:

$$C = \frac{C_1 * VB^m}{h^x * b^y} \quad (2.7)$$

La ecuación de Taylor generalizada es pues:

$$V = \frac{C_4 \cdot VB^m}{h^x \cdot b^y \cdot T_{VB}^n} \quad (2.8)$$

La constante C_4 tiene el siguiente significado físico: es la velocidad (m/min) para una duración de la herramienta de un minuto y un desgaste, espesor y anchura de la viruta de 1mm.

Los coeficientes x , y , n y la constante C_4 dependen del material de la pieza, de la herramienta y del tipo de mecanizado.

T_{VB} es el tiempo de mecanizado entre dos afilados sucesivos para el desgaste VB permitido.

La ecuación (2.8) es de difícil aplicación ya que normalmente el espesor y el ancho de la viruta no son conocidos, mientras que sí lo son la profundidad de pasada p , el avance a y el ángulo de ataque X (figura 2.1).

Teniendo en cuenta las relaciones siguientes:

$$h = a * \text{sen } X \quad (2.9)$$

$$b = \frac{p}{\text{sen } X} \quad (2.10)$$

la ecuación (2.8) se convierte en:

$$v = \frac{C_1 * VB^m}{a^x * p^y * (\text{sen } X)^{x-y} * T_{VB}^n} \quad (2.11)$$

Por otra parte, el valor de VB suele estar fijado por los criterios de desgaste o las tolerancias permitidas. También el ángulo X suele fijarse cuando se ha determinado el mecanizado a realizar por lo que los factores relativos a C_1 , VB y $\text{sen } X$ suelen englobarse en una constante:

$$v = \frac{C_{VB}}{a^x * p^y * T_{VB}^n} \quad (2.12)$$

De esta manera, existen tabulados C_{VB} , x , n e y para una serie de pares herramienta-material según unos valores determinados de VB y X .

2.1.3 Ecuación de Kronenberg

La realización de numerosos ensayos llevó a Kronenberg /50/, /51/ a plantear una ecuación semejante a la (2.8), sólo que considerando la sección $A (= b \cdot h)$ y el factor de forma de la viruta $G (= b/h)$:

$$v = \frac{C_2 \cdot (G/5)^3}{A^f \cdot (T/60)^g} \quad (2.13)$$

Esta ecuación se puede deducir fácilmente de la anteriormente referida /52/ teniendo en cuenta que el factor VB no aparece ahora porque el criterio adoptado por Kronenberg en sus ensayos fue el de "caída" de la herramienta. El coeficiente 60 se debe a que los valores que toma ahora la constante C_2 son para duraciones de 60 minutos.

2.1.4 Ecuación de Schallbroch y Schaumann.

Schallbroch y Schaumann /53/ identificaron la siguiente

relación entre temperatura de corte y duración de la herramienta:

$$T * \theta^l = C \quad (2.14)$$

donde l es una constante para una combinación dada de herramienta y material de trabajo.

Esta ecuación se complementa con /54/:

$$\theta = C_4 * v^m * a^p \quad (2.15)$$

o con /55/ y /56/:

$$\theta = C_5 * v^m * a^p * F(\phi) * F(W) \quad (2.16)$$

para tener en cuenta la influencia del material, la herramienta y las condiciones de corte sobre la temperatura en taladrados. En la última ecuación $F(\phi)$ es una función del diámetro de la broca y $F(W)$ es una función del desgaste acumulado.

De la misma manera, para herramientas de torno se tiene /1/:

$$\theta = C_6 * v^c * h^d * b^e \quad (2.17)$$

o bien de un modo más general /57/

$$\theta = C_7 * v^c * h^d * b^e * VB^f \quad (2.18)$$

Las ecuaciones (2.17) y (2.18) pueden ser deducidas a partir de la (2.14) y la ecuación de Taylor generalizada.

2.2 MODELOS TEORICOS DE PREDICCIÓN

Muchos trabajos teóricos y experimentales han sido realizados con el objeto de extender la aplicación de las ecuaciones presentadas en el apartado anterior o presentar modelos basados en nuevas ideas. Algunos de los más significativos son presentados a continuación.

2.2.1 Ecuaciones basadas en el concepto de viruta equivalente.

Woxen originalmente /58/, /59/ y posteriormente Whitehead /60/ relacionaron la duración de la herramienta con su temperatura, considerando un balance térmico en condiciones de régimen. Woxen demostró que la temperatura de corte es función directa de la viruta equivalente q , la cual se define como la razón de la longitud del filo activo L a la sección A de la viruta (figura 2.5):

$$q = \frac{L}{A} \quad (2.19)$$

La ecuación que determina la vida de la herramienta, según sus trabajos es:

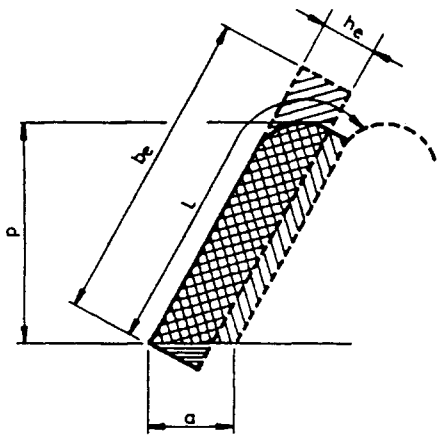


Fig.2.5 Sección de viruta equivalente

$$v = \left(\frac{T}{T_x} \right)^\alpha * C_u * \left(\frac{q_0 + q}{1 + gq} \right) \quad (2.20)$$

donde T_x es una duración prefijada, C_u una constante dependiente del material de la pieza y la herramienta y relacionada con T_x y α , g y q_0 otras constantes. Desgraciadamente las aplicaciones prácticas de esta ecuación son bastante engorrosas.

Colding /61/ utilizando relaciones del tipo:

$$v * T^\alpha * q^\beta = C' \quad (2.21)$$

puso en claro que los exponentes α y β no son necesariamente constantes. Recurriendo al análisis dimensional, propuso la siguiente ecuación:

$$k + a \log q + c \log v - \log T + h \log q \cdot \log T = 0 \quad (2.22)$$

siendo a , c y h unas constantes.

Posteriormente de forma más general, postuló:

$$k - ax + bx^2 + cy + dy^2 - z + e z^2 + f xy + g yz + hxz = 0 \quad (2.23)$$

siendo:

$$x = \log q$$

$$y = \log v \quad (2.24)$$

$$z = \log T.$$

2.2.2 Ecuación de König-Depiereux.

Los exponentes n y x de las ecuaciones (2.1) y (2.5) no pueden suponerse constantes en un gran número de casos. Para tener en cuenta esta situación König y Depiereux /62/ y /63/ formularon una nueva ecuación, considerando que la inclinación de la curva $\log T - \log v$:

$$n = - \left(\frac{\partial \log T}{\partial \log v} \right)_a \quad (2.25)$$

siendo a el avance, podía responder a una ley exponencial del tipo:

$$n = n_v \cdot v^k \quad (2.26)$$

y que la inclinación de la curva $\log T - \log a$:

$$x = - \left(\frac{\partial \log T}{\partial \log a} \right)_v \quad (2.27)$$

podía responder a ley del tipo:

$$x = x_0 \cdot a^i \quad (2.28)$$

Teniendo en cuenta que:

$$\left(\frac{\partial \log T}{\partial \log v} \right)_a = \left(\frac{\partial \log T}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial v} \cdot \frac{\partial v}{\partial \log v} \right)_a \quad (2.29)$$

y que:

$$\left(\frac{\partial \log T}{\partial \log a} \right)_v = \left(\frac{\partial \log T}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial a} \cdot \frac{\partial a}{\partial \log a} \right)_v \quad (2.30)$$

resulta:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial v} \right)_a = -T \cdot n_v \cdot v^{k-1} \quad (2.31)$$

y

$$\left(\frac{\partial T}{\partial a} \right)_v = -T \cdot x_a \cdot a^{i-1} \quad (2.32)$$

Considerando que:

$$dT = \frac{\partial T}{\partial v} dv + \frac{\partial T}{\partial a} da \quad (2.33)$$

se tiene:

$$\int \frac{dT}{T} = - \int n_v \cdot v^{k-1} \cdot dv - \int x_a \cdot a^{i-1} \cdot da \quad (2.34)$$

y finalmente:

$$T = e^{-(n_v/k) \cdot v^k - (x_a/i) a^i + c} \quad (2.35)$$

donde n_v , x_a , k , i y c son constantes.

2.2.3 Modelos basados en la temperatura de corte

Como ya indicamos en el capítulo anterior Trigger y Chao /25/ postularon que el desgaste de cráter corresponde a una función exponencial de la temperatura media en la superficie de contacto viruta-herramienta a partir del punto en que la temperatura es suficientemente elevada para producir el fenómeno de difusión.

Takeyama y Murata /64/ trataron de extender la teoría de Trigger y Chao al desgaste de flanco. Partiendo de la ecuación:

$$VB = VB_f(n, \sigma_s) + VB_a(L, \sigma_a) + VB_r(\theta, T) + VB_i \quad (2.36)$$

donde:

VB es el desgaste de flanco total

VB_f es el desgaste debido a fracturas

VB_a es el desgaste debido a la abrasión

VB_r es el desgaste debido a procesos fisicoquímicos

VB_i es el desgaste debido a otros mecanismos

σ_f es la resistencia a la fractura del material de la herramienta

σ_a es la resistencia a la abrasión del material de la herramienta

n es el número de choques

L es la longitud del material cortado

θ es la temperatura absoluta en la arista de corte

T es la duración del corte

y despreciando el desgaste de fractura y el debido a otros mecanismos y considerando la situación en la que el desgaste debido al proceso físico-químico es el predominante frente al de abrasión llegaron a la siguiente ecuación:

$$VB_o = B \exp(-E/K \theta_o) T_o \quad (2.37)$$

donde:

E es la energía de activación

VB_0 es el desgaste para una duración T_0

θ_0 es la temperatura inicial del corte

B es una constante asociada con los materiales de trabajo y de la herramienta

Su modelo predice la vida de la herramienta, para una determinada combinación de material y herramienta a partir únicamente de la temperatura inicial del corte θ_0 .

Ho y Chen /65/ han continuado los estudios anteriores y han desdoblado el anteriormente denominado proceso físico-químico de desgaste en sus dos mecanismos: la adhesión y la difusión. Partiendo ahora de la ecuación:

$$VB = VB_1(n, \sigma_s) + VB_{ab}(L, \sigma_a, \sigma_w) + VB_{ad}(L, P/H) + VB_d(\theta, t) + VB_i \quad (2.38)$$

donde:

VB_{ab} es el desgaste debido a la abrasión

$VB_{a,d}$ es el desgaste debido a la adhesión

VB_d es el desgaste debido a la difusión

P la carga normal

H es la dureza media del material de trabajo a la temperatura existente

σ_c es la resistencia a la abrasión del material de trabajo

y el resto de los parámetros son los mismos que antes; y realizando nuevamente ciertas simplificaciones determinaron que el volumen del desgaste respondía a la siguiente ecuación:

$$0.9 \rho \ast Vol = \rho \ast K \ast A^{0.75} \ast V_c \int_0^T h_f^{0.525} dt + 1.1284 \ast G(m_f/m) b \sqrt{V_c} \int_0^T C_0 \sqrt{(D \ast h_f)} dt \quad (2.39)$$

en la que:

ρ es la densidad del material de la herramienta

V_{ol} es el volumen de herramienta desgastado

K es un coeficiente de interacción entre pieza y herramienta dependiente de la temperatura.

V_c es la velocidad relativa de deslizamiento

h_f es el ancho medio del desgaste

G es el peso específico del material de trabajo

m_d es el peso atómico del material difundido

m es el peso atómico del material disolvente

b es la profundidad del corte

C_0 es la concentración del material difundido en la interfase

D es el coeficiente de difusión del material difundido

A es una constante de proporcionalidad

Muy recientemente Venuvinod et al. /57/ han intentado explicar la diferencia entre las predicciones teóricas de Trigger y Chao /21/ y los resultados experimentales, suponiendo al igual

que Holm /32/ que el contacto entre las superficies deslizantes tenía lugar en puntos discretos. Para ello introdujeron un nuevo parámetro: $\bar{\theta}_{fs}$, que aunque no tiene un sentido físico definido puede ser considerado como una medida representativa del campo de temperatura existente en la vecindad de la interfase material-herramienta en la zona de desgaste del flanco y plantearon la siguiente ecuación:

$$T. \bar{\theta}_{fs}^q = C_s \quad (2.40)$$

donde q es la constante para una determinada combinación de herramienta y pieza.

2.2.4 Otros trabajos

Lee /66/ desarrolló un modelo matemático usando una ecuación de difusión de masa unidimensional para predecir la profundidad del cráter. No obstante, los resultados experimentales no son satisfactoriamente explicados. Koren /67/ usó la teoría de control para predecir la propagación del desgaste de flanco. Su modelo suponía que el desgaste era activado por un mecanismo térmico y otro mecánico y que este desgaste realimentaba el proceso al aumentar las fuerzas en juego. Lenz /68/ estudió la relación entre el desgaste de flanco y la longitud del contacto

viruta-herramienta para carburos cementados.

2.3 MODELOS EXPERIMENTALES Y ESTADÍSTICOS DE PREDICCIÓN.

En el apartado anterior hemos visto un buen número de modelos teóricos de predicción de la duración de la herramienta de corte utilizada en procesos de mecanizado. Para su desarrollo, aún en los más completos, ha sido necesario realizar ciertas simplificaciones que no siempre son válidas en las actuales condiciones de operación. Por otro lado, los modelos más exactos suelen ser a su vez los más engorrosos de manejar. Debido a estas razones algunos investigadores han trabajado en el desarrollo de relaciones empíricas a partir de datos experimentales. Los primeros trabajos en este camino fueron realizados por Wu /69/ quien usó un modelo de segundo orden (dos variables: velocidad y avance) para predecir la duración de las herramientas. Otros investigadores en este campo fueron Colding /70/, Kuljanic et al. /71/, Williams et al. /72/ y Lorenz /73/. La aproximación desarrollada por Wu /69/ para herramientas de corte único fue extendida por otros autores a las herramientas de fresadoras y taladros. Bhattacharyya et al. /74/ desarrollaron un modelo de desgaste de flanco basado en el mecanismo de adhesión y dedujo a partir de él una ecuación de la vida de la herramienta.

Muchos de los modelos presentados son deterministas y no consideran la variabilidad de las condiciones de operación. Por esta razón otros investigadores han tenido en cuenta la naturaleza estocástica de la duración de la herramienta, en el reco-

nocimiento de que podría suministrar un análisis más efectivo del fenómeno. Seguidamente veremos algunos ejemplos.

Wager y Barash /75/ estudiaron empíricamente la variación de la duración de la herramienta de acero rápido, y mostraron que podía ser aproximada por una distribución normal. También indicaron que la variabilidad era mayor cuanto menor era la velocidad de corte (figura 2.6).

DeVor et al. /76/ hallaron que la variación de la vida de la herramienta crecía conforme el valor elegido para el criterio de desgaste aumentaba. Introdujeron un método ponderado de mínimos cuadrados para el análisis de los datos de la duración, donde la variación de esta no fue homogénea sobre las condiciones de corte, y las mejores estimaciones fueron hechas a través de una estimación de varianza mínima.

Ramalingam /77/ realizó un extenso trabajo tratando de predecir teóricamente la distribución de la vida de las herramientas, según el tipo de criterio de duración empleado: fallo catastrófico, desgaste continuo o ambos a la vez, y halló que correspondía a una distribución Gamma para el corte continuo y una distribución Weibull para el corte interrumpido. En la posterior validación experimental que llevó a cabo obtuvo unos resultados satisfactorios.

Hitomi et al. /78/ estudiaron la fiabilidad de las

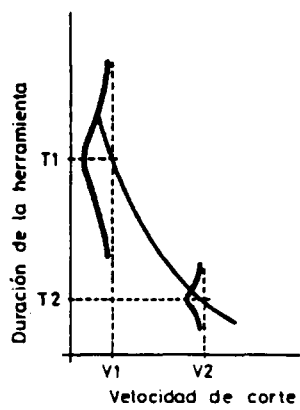


Fig.2.6 Variabilidad de la duración de la herramienta con la velocidad de corte

herramientas de corte con varios niveles de desgaste. De los resultados experimentales obtuvieron una distribución estadística del desgaste y de ella dedujeron la función de distribución de la duración y la función de fiabilidad de las herramientas. De este modo comprobaron que la fiabilidad de las herramientas de corte disminuía cuando la velocidad aumentaba.

Cuando se considera la naturaleza estocástica de la duración de la herramienta, es esencial en producción automatizada hallar que estrategia de cambio de herramienta es la adecuada para minimizar el corte por pieza. Las normalmente consideradas son las siguientes:

- Plan de substitución de herramienta programado,
- Plan de substitución de herramienta preventivo,
- Plan de substitución bajo fallo de herramienta.

En el primer caso la herramienta es reemplazada cuando ha cortado un determinado tiempo; en el segundo caso es cambiada cuando un preestablecido número de piezas han sido fabricadas, no importa cuanto haya sido usada la herramienta; en el último caso la herramienta es cambiada cuando la herramienta falla.

Commare et al. /79/ han propuesto recientemente una aproximación analítica para extender los planes de cambio de

herramienta actualmente usados en sistemas de manufactura en los cuales las piezas deben ser rechazadas si la herramienta falla mientras está cortando. Los modelos propuestos tienen en cuenta el coste de la pieza rechazada y el tiempo que había sido empleado en su preparación. Dichos modelos son aplicables a cualquier tipo de distribución estocástica.

2.4 UTILIDAD DE LOS MODELOS

En los epígrafes anteriores hemos descrito los modelos más importantes desarrollados para estimar la duración de las herramientas de corte en procesos de mecanizado. Su aplicación en los sistemas de mecanizado automático, en los cuales se desea aprovechar al máximo la vida del útil sin por ello esperar a que su rotura produzca daños, presenta los siguientes problemas:

- Los modelos teóricos han sido deducidos realizando ciertas aproximaciones lo que limita su validez. Por otra parte pueden resultar engorrosos de manejar.
- Los modelos empíricos resultan válidos solamente para las condiciones experimentales en que han sido desarrollados, las cuales no siempre coinciden con las actuales condiciones de operación en la industria.
- Los modelos estocásticos no siempre pueden predecir el fallo de una herramienta de antemano debido a la gran variabilidad de las estimaciones y a las numerosas variables envueltas en los complejos procesos de mecanizado. Por otra parte las estrategias de cambio de herramienta al tener que ser conservadoras conducen a un pobre empleo de su vida útil.

- No son considerados los eventos inesperados y accidentes.

- Tampoco consideran generalmente la dinámica del proceso, lo que suele ser una gran causa del deterioro de las herramientas.

La presencia de estos inconvenientes ha conducido en los últimos años a tratar el problema de la predicción de la duración de la herramienta dentro del área de la supervisión del proceso de mecanizado. La cual tiene por objeto resolver una categoría de problemas más amplia, si bien él del desgaste y la rotura de la herramienta sean los más importantes y complejos. Con esta técnica el estado del útil es evaluado durante el proceso a través de observaciones directas o indirectas, en lugar de usar modelos para predecir su duración.

2.5 SUPERVISION DEL MECANIZADO.

La introducción del Control Numérico supuso un avance significativo en la automatización de la producción. Sin embargo, su utilización no tiene en cuenta la incertidumbre del proceso, en el que el comportamiento de la herramienta es posiblemente el más crítico y menos conocido elemento de la producción automatizada. Por esta razón, actualmente es difícil enfrentarse con problemas tales como /80/:

- Variaciones en la maquinabilidad de los materiales, en las herramientas y en las condiciones del mecanizado.
- El efecto de los cambios de temperatura en la calidad de las piezas (el 40% de los errores geométricos dependen de la temperatura).
- La necesidad de ajustes y calibraciones (hasta el 60% del tiempo de máquina está ocupado en actividades no productivas).
- Paradas de emergencia, averías, etc.

El proceso de producción debe ser supervisado con el fin de solventar estos inconvenientes.

El objetivo de la supervisión es detectar anticipadamente fallos que podrían ocasionar daños, generar datos fiables sobre el tipo y localización de los primeros, permitir la optimización de funciones como el costo o la producción y realizar un mecanizado adaptado a sus condiciones.

La introducción de sistemas de supervisión y diagnóstico presupone un análisis preciso de los parámetros que deben ser monitorizados, la selección de los sensores adecuados para describir el estado del proceso y la colocación de los sensores en el sistema /81/.

Las tareas que deben realizar los sensores son /82/, /83/:

- Reconocimiento de piezas e inspección de su posición, orientación y dimensiones.
- Identificación de la herramienta, supervisión de su estado de desgaste y detección de su rotura.
- Supervisión de las condiciones de la máquina y de los sistemas de control.

La creación de dichos sensores puede permitir la implantación de las técnicas de Control Adaptativo /82/, /80/, /83/, /84/, /85/, /86/, /87/, /88/, /89/ y avanzar hacia el meca-

nizado desatendido (esto es, sin intervención humana) /82/, /80/, /83/. La introducción de los sensores también da lugar a mecanizados más económicos, como ha sido ya probado en algunos estudios /83/, /90/.

La realización de sistemas de supervisión del mecanizado esta todavía en sus fase inicial. Como veremos seguidamente para alcanzar los objetivos deseados hay que realizar todavía un gran esfuerzo de investigación. Los capítulos siguientes de la presente memoria pretenden ser una aportación útil en este sentido.

2.6 REVISION DE LA ACTUAL TECNOLOGIA DE SENSORES PARA EL SEGUIMIENTO Y CONTROL DEL MECANIZADO.

Existen varias revisiones recientes sobre el actual estado de desarrollo de sensores /86/, /87/, /82/, /83/, /85/, /84/, /91/, /92/, /93/. A continuación haremos un repaso de los más significativos, clasificandolos según su principio de medida y estudiaremos sus posibilidades y limitaciones, haciendo hincapié en sus características para evaluar el estado de la herramienta.

2.6.1 Sensores dimensionales

Estos sensores miden distancias, ya sea por contacto o proximidad. Sus tareas son detectar la presencia de piezas, así como su distribución espacial y dimensiones, medir el desgaste de la herramienta, informar sobre su rotura y realizar inspecciones finales. A su vez pueden ser subdivididos en:

2.6.1.1 Sondas de contacto

Como ejemplo de sensor de medida por contacto se puede citar la sonda Renishaw, un dispositivo de precisión y omnidireccional compuesto de un cuerpo y una aguja, que bajo la acción de un impulso puede ser desviada en cualquier dirección hasta el

contacto con otro cuerpo y medir el desplazamiento realizado /94/, /95/, /96/. Otro sensor de este tipo usa la misma herramienta como palpador /97/.

Este tipo de sondas permiten ser usadas para todas las tareas propias del grupo de sensores dimensionales al que pertenecen, entre ellas la inspección del estado de la herramienta. Esta multiplicidad de aplicaciones unida a su gran precisión y repetibilidad hace que el uso de estas sondas, especialmente la Renishaw, este muy extendido. Entre las desventajas hay que citar que sólo pueden ser usadas en máquinas con desplazamiento en tres ejes y con un sistema de lectura de medida ya que por si solas no miden nada. Pero sobre todo su principal inconveniente es que no pueden ser usadas durante el proceso de arranque de viruta, por lo que al tener que alternar los tiempos de medida con los de mecanizado su uso se hace gravoso a la vez que no suministran información del proceso durante el desarrollo de este.

2.6.1.2 Sensores de proximidad.

Dentro de este subgrupo de sensores los hay de distintos tipos. Algunos de ellos han sido desarrollados bajo un principio inductivo para detectar herramientas rotas. Generalmente estan montados en la misma máquina y el útil es llevado a ellos para comprobar su estado. Otros miden el desgaste por medio de la variación de la capacidad de un condensador cuando cambia

la distancia entre sus electrodos (principio capacitivo). En este caso la anchura del desgaste se mide en dirección perpendicular al desgaste de flanco VB, por lo que este debe ser calculado a partir de la geometría de la herramienta. Estos sensores tienen nuevamente la limitación de no poder funcionar simultáneamente con el proceso, por lo que el ciclo de inspección ocupa un tiempo no deseado; además la detección de la rotura tiene lugar después de que ésta ha ocurrido.

También existen sensores neumáticos. Con ellos puede medirse nuevamente el desgaste radial, no el de flanco, por aumento de la presión de un fluido que circule entre la cara de incidencia principal de la herramienta y la superficie mecanizada cuando la distancia entre estas disminuye por el efecto del desgaste. Una combinación de sensores neumáticos fue usada por Bath y Sharp /98/ para reducir los errores en las dimensiones de la pieza mecanizada que ocurrieran debido al desgaste de la herramienta, desalineaciones, deflexiones de la pieza, etc. También Stäferle y Bellman /99/ y otros /100/ han usado sensores de este tipo. Estos sensores pueden ser usados durante el proceso pero su desventaja es que variaciones en la presión, temperatura, etc. afectan notablemente a los valores medidos por lo que resultan poco fiables.

2.6.2 Sensores de esfuerzos

El trabajo de investigación para determinar la correlación entre las fuerzas de corte y el desgaste de la herramienta fue iniciado debido a que estas fuerzas pueden ser medidas durante el proceso. Dado que la maquinabilidad del material de trabajo afecta en gran medida a la velocidad de desgaste de la herramienta, la medida del desgaste de forma continua, a través de los esfuerzos del mecanizado, puede ser de gran valor para realizar un Control Adaptativo. Taraman et al. /101/ señaló que la fuerza de corte varía linealmente con el desgaste VB.

Los sensores de esfuerzos se usan tanto para indicar condiciones de funcionamiento interno de la máquina como esfuerzos del mecanizado.

Existen ya algunos sensores comerciales para medir las fuerzas de corte en tornos, taladros y fresas. En el primer caso pueden estar situados entre la base de la torreta y el carro de la máquina /102/, /103/, /96/ o bien servir ellos mismos como portaherramientas /13/. En taladros y fresas suelen colocarse en su mesa /82/. La medida de las fuerzas de corte puede hacerse en varias direcciones y el método empleado es piezoeléctrico o extensométrico.

También existen dinamómetros contruidos en los cojinetes a bolas del husillo principal /104/, /95/. Sus funciones son diversas y van desde detectar la presencia de piezas a determinar condiciones de operación de la máquina por medio de la medida de

las fuerzas internas de los cojinetes. El estado de desgaste excesivo de la herramienta es detectado a través del aumento de la fuerza de avance. El uso de esta componente se basa en los trabajos de Langhammer /13/ y Wolf y Magadanz /12/ quienes señalaron que el efecto del desgaste de las herramientas es más notorio en las fuerzas de avance que en las corte o penetración.

Los sensores de esfuerzos también han sido diseñados y utilizados en determinados estudios de laboratorio /105/, /106/, /107/, /3/, /89/.

Este tipo de sensores constituyen un buen principio para la supervisión del mecanizado. No obstante, los que existen comercializados resultan todavía muy groseros: se procede a cambiar la herramienta cuando la fuerza medida supera durante un cierto tiempo un valor que debe ser fijado por el usuario. Algunos, por su volumen, además encontrarían graves dificultades de instalación en centros avanzados de torneado. De cualquier modo la utilización de estos sensores exige realizar cambios en el diseño de las máquinas e introducir en ellas nuevos mecanismos que las hacen más costosas y complejas.

2.6.3 Sensores de temperatura.

En el principio de este capítulo se ha visto la dependencia de la temperatura con las condiciones de corte y por tanto

con la duración de la herramienta. En base a esta relación se ha tratado de evaluar el desgaste del útil a través de la tensión de termopar generada entre él mismo y la pieza que se mecaniza /54/, /108/, /55/. A pesar de que, como indicaron Zakaria y ElGomayel /22/, la temperatura de corte y por tanto la tensión de termopar primero crecen con el desgaste y posteriormente tienden a estabilizarse, con pequeños cambios en el valor medio de la tensión de termopar para notables aumentos del desgaste, el sensor de temperatura pensamos que podría ser usado como complementario de otros /56/, /109/, ya que como sostiene Micheletti /1/ "el problema de la velocidad de desgaste de la herramienta debe estudiarse no sólo considerando la velocidad de corte, sino también la temperatura, que favorece la difusión y la formación de soldaduras y aleaciones en la superficie de contacto viruta-cara de corte de la herramienta".

2.6.4 Sensores de corriente y potencia eléctrica.

Estos sensores aprovechan las ventajas de facilidad de medición de las corrientes y tensiones eléctricas y el ahorro de mecanismos que soporten el sensor, el cual lo constituye en parte la misma máquina.

Existen comercializados algunos de ellos. Así por ejemplo hay una versión que a partir de la potencia eléctrica consumida por el motor y de su velocidad, medida por medio de un tacó-

metro, calcula el par; a continuación compara los valores de este y de la potencia con unos límites prefijados para realizar las siguientes tareas: protección de sobrecarga de la herramienta, protección de máquina, detección de la presencia de pieza, control del refrigerante y límite de avance para que el par de corte en un taladro no exceda del 50% de un valor programado (Control Adaptativo restringido). Sin embargo, no da indicación del estado de la herramienta /110/.

Hay otro sensor que funciona de forma similar. En este caso se calcula la potencia consumida a partir de la tensión, la corriente y el factor de potencia. Esta magnitud puede ser usada para protección de sobrecargas o Control Adaptativo. Pero este sensor no calcula pares y mucho menos informa sobre el estado del útil.

La corriente eléctrica, exclusivamente, también es utilizada por un fabricante japonés de máquinas herramienta, como medida de protección, si aquella supera un límite prefijado.

Matsushima et al. /111/ estudiaron la detección de picado y roturas de los dientes de una fresa a partir de la corriente eléctrica que pasaba por el motor de la máquina mediante un modelo autorregresivo de series temporales de orden 28. El error de observación residual que encontró resultó ser muy sensible a las variaciones bruscas en los esfuerzos de corte. No obstante, para su aplicación práctica encontró que: 1) la frecuencia

de paso de los dientes de la fresa y sus armónicos están muy atenuados para altas velocidades de corte y 2) el error residual resulta también muy afectado cuando la herramienta entra en contacto con la pieza y cuando acaba el corte.

Podría sacarse un resultado muy provechoso de estos sensores si pudieran precisar no sólo el desgaste excesivo, lo que aún hoy en día está exigiendo conocer más estrechamente la relación entre las componentes de la fuerza de corte y el desgaste para distintos materiales y tipos de trabajo, sino también el grado de desgaste en cada momento.

2.6.5 Sensores de emisión acústica.

La emisión acústica son ondas de energía elástica que resultan espontáneamente de la rápida liberación de ésta en un material debido a un reordenamiento de su estructura interna. Su utilización para evaluar el estado del filo de corte ha sido sugerida desde hace años /112/, sin embargo, continúa teniendo auge y es una técnica muy estudiada actualmente /113/, /114/, /115/, /116/, /117/, /118/, /119/, /120/, /121/.

Su dificultad de aplicación proviene de lo complejo de la señal a analizar. Su medida se hace con transductores piezoeléctricos. En la actualidad con este método es posible detectar roturas de brocas /122/ y cuchillas de tornos /97/.

2.6.6 Sensores basados en otros principios.

2.6.6.1 Sensores de resistencia eléctrica.

Wilkinson /123/, /124/ estudió las propiedades eléctricas del interfase herramienta-pieza. En particular, el valor medio y la componente de ruido de la resistencia de constricción. Esta resistencia, debida al constreñimiento de las líneas de flujo de una corriente eléctrica que pase a través del interfase se determina midiendo la caída de tensión al paso de una corriente prefijada. Asimismo, propuso una relación entre la resistencia (su valor medio) y los parámetros de corte, el desgaste de flanco VB, y la geometría y la resistividad de la pieza y de la herramienta, encontrando una buena concordancia experimental. Basándose en esta fórmula desarrolló un sistema para la medida continua y simultánea con el proceso del desgaste de las herramientas.

Los valores típicos de esta resistencia son del orden de mohm por lo que su medición con precisión exige la utilización de grandes corrientes, o una instrumentación sofisticada. Por otra parte algunos autores /125/ han criticado el método.

Otras técnicas usan resistencias muy finas (peculiares) /126/ pegadas en la cara de incidencia principal. Según progresa el mecanizado parte de la resistencia va desapareciendo, a medida

que crece la anchura de la franja de desgaste, con lo que ésta puede ser evaluada.

2.6.6.2 Sensores de vibración de la herramienta.

Actualmente se están realizando ensayos para determinar el desgaste de las herramientas de torno a partir de las frecuencias propias de vibración de éstas. Fenómenos aleatorios que aparecen han dificultado por el momento la obtención de resultados de interés /127/.

2.6.6.3 Sensores de radiactividad.

En el desarrollo de sensores de desgaste se ha llegado a activar las herramientas de corte y a partir de la disminución de la radiación emitida evaluar la masa de material perdido y de aquí el desgaste de la herramienta /85/. Obviamente, es difícil que este método ensayado en laboratorio pueda industrializarse.

2.6.6.4. Medida de la rugosidad superficial.

Diversos estudios teóricos y prácticos se han realizado acerca del acabado superficial de la pieza mecanizada con el fin de supervisar las condiciones del mecanizado. La medida de la

rugosidad superficial puede ser llevada a cabo mediante varias técnicas : ultrasonidos, fibra óptica, laser, etc. Entre las aportaciones más recientes en este área se encuentran las de Konczakowski /128/, Wong et al. /129/ y Raja et al. /130/.

2.7. PROBLEMAS GENERALES DE LOS ACTUALES SENSORES.

Como se ha podido ver, numerosas técnicas han sido utilizadas hasta el presente para dar soluciones adecuadas al problema del desgaste y la rotura de las herramientas dentro del área de la supervisión del mecanizado. El hecho de que ninguna técnica se haya implantado definitivamente indica las limitaciones que cada una de ellas tiene, si bien unas son más ventajosas que otras, y que el problema sigue abierto.

Las dificultades con que tropiezan muchos sensores descritos a la hora de su aplicación industrial tienen que ver con su falta de precisión, con las dificultades y costes de montaje en máquinas-herramienta estandar y con la imposibilidad de operar simultáneamente al proceso, lo que limita su aplicación y nuevamente incrementa los costes de producción.

En el siguiente capítulo se propone un sensor basado en la medida de la corriente y tensión eléctricas que trata de evitar las dificultades anteriormente señaladas.

CAPITULO III

SISTEMA PARA LA SUPERVISION EN TIEMPO REAL DEL PROCESO
DE MECANIZADO EN UNIDADES DESATENDIDAS

SISTEMA PARA LA SUPERVISION EN TIEMPO REAL DEL PROCESO
DE MECANIZADO EN UNIDADES DESATENDIDAS

En el capítulo anterior se han presentado los trabajos más significativos que han sido realizados con el objeto de predecir la duración del útil de corte en procesos de mecanizado. También se ha visto la dificultad de realizar dicha predicción, debido al gran número de variables involucradas y su variabilidad, y que la solución debe dirigirse hacia la supervisión del mecanizado mediante la observación de las variables dependientes del proceso. Supervisión que además, como fue señalado en el epígrafe 2.5 ,permite realizar otras acciones.

Para llevarla a cabo muy diferentes métodos se han aplicado, sin que hasta el momento se hayan obtenido más que algunos escritos parciales; por lo que actualmente existe una gran necesidad de disponer de sensores que careciendo de los inconvenientes de los presentes suministren una mejor información.

Con esta idea se presenta en este capítulo un sensor basado en la medida de la corriente y tensión eléctricas; lo que le confiere unas enormes ventajas de construcción, coste e instalación, junto con su posibilidad de funcionar en proceso, sin dificultar en absoluto el mecanizado, y la posibilidad de suministrar dos variables: la potencia eléctrica y el par mecánico;

lo que resulta más ventajoso que disponer de una sólo, como ocurre al utilizar sensores de esfuerzos, y más si esta variable no es utilizable en Control Adaptativo, caso de los sensores de emisión acústica.

Se describen también en este capítulo dos sensores, de esfuerzos y temperatura, complementarios del anterior; ejecutados con fines experimentales para presentar información cruzada entre ellos, ya que ningún dato de este tipo ha podido ser encontrado en la bibliografía y a nuestro juicio, dado que cada tipo de sensor es mejor para una tarea que los otros, un mecanizado desatendido sólo puede ser logrado por medio de un sistema multisensor cooperante.

Se acaba describiendo un sistema automatizado de control y medida para realizar la supervisión en tiempo real del mecanizado por medio de la evaluación de parámetros característicos de este. El sistema es utilizado, a la vez, para determinar la utilidad de los sensores construidos.

3.1. FUNDAMENTO DEL SENSOR BASICO.

Por las numerosas razones más arriba expuestas, el sensor básico del sistema puesto a punto se funda en la observación de la corriente y tensión eléctricas. En el capítulo anterior se han mostrado otros tres sensores basados en el mismo principio. La concepción que aquí se presenta resulta notablemente más ventajosa que las anteriores como a continuación se verá.

Siendo la estimación de las condiciones del útil el problema más complejo para la automatización del proceso, se ha diseñado el sensor de manera que mejor pudiera resolver este, aunque también pueda realizar otras tareas. De acuerdo con esto y dado que el desgaste de la herramienta influye más notoriamente en la fuerza de avance que en las de corte y penetración /12/, /13/, la magnitud que debería ser examinada es la potencia eléctrica consumida por el motor encargado de accionar el avance de la herramienta. Los sensores actualmente existentes miden la potencia o la corriente eléctrica del motor principal, sea éste el único que tiene la máquina o no, por lo que resultan mucho menos sensibles al desgaste de la herramienta que los sensores de esfuerzos que miden la fuerza de avance. Si la máquina tiene motores independientes, la potencia eléctrica del motor principal puede dar una indicación indirecta de la fuerza de corte, pero si dispone de un único motor, el examen de la potencia eléctrica

consumida suministrará una información muy pobre del estado de la herramienta.

Otro aspecto importante es la elección del tipo de motor de avance en el que mediremos la corriente y tensión. La tendencia actual es usar motores de corriente continua para las máquinas-herramienta dotadas de Control Numérico debido a que para ellos pueden diseñarse circuitos de control mas precisos y menos complejos, y por lo tanto mas económicos /131/. Entre los motores de corriente continua los de imán permanente suelen ser los preferidos por las siguientes razones /132/.

- sus características par-velocidad son lineales,
- no necesitan energía eléctrica para generar el flujo magnético, y
- presentan unas buenas relaciones de tamaño y peso a potencia suministrada.

Para el objetivo que nosotros perseguimos estos motores presentan otra notoria ventaja: la linealidad de su característica par-corriente (ver figura 3.1). En efecto, usando un motor de este tipo podemos conocer el par mecánico a partir de una medición tan sencilla como la de la corriente eléctrica que por el circula. Y el par mecánico en régimen permanente, restando las pérdidas, es proporcional a la componente de la fuerza de corte

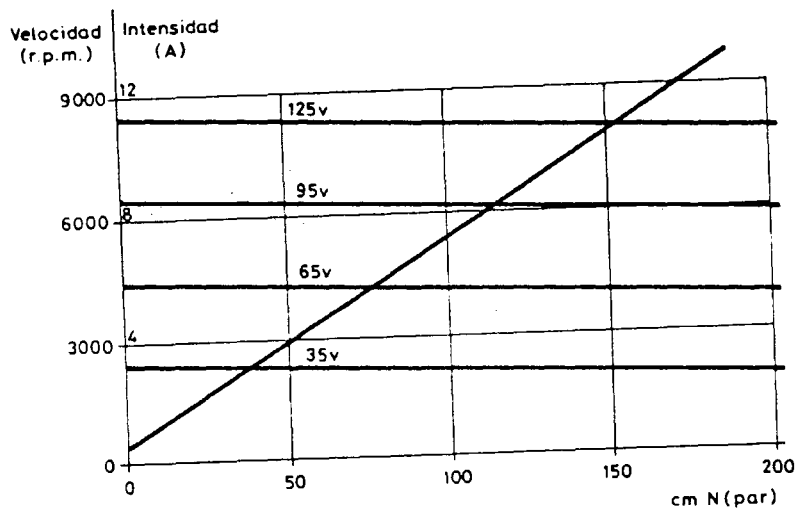


Fig.3.1 Características típicas de un motor de imán permanente

debida al propio motor. Expresado esto matemáticamente, y para el caso más general, tendríamos:

$$M = K * I \quad (3.1)$$

$$M = (J_M + J_L) * \frac{d\omega}{dt} + D * \omega + M_f + M_L \quad (3.2)$$

donde:

I es la corriente que produce el par M

J_M es momento de inercia de motor

J_L es el momento de inercia de la carga

ω es la velocidad angular del motor

$D * \omega$ representa el par de fricción viscosa

M_f representa el par debido a rozamientos

M_L representa el par debido a la carga.

Debido a que los procesos de mecanizado se realizan por lo general a velocidad constante la última ecuación puede ser expresada como:

$$M = M_p + M_L \quad (3.3)$$

donde ahora M_p engloba a todos los pares ejercidos en contra de las fuerzas de rozamiento (pérdidas).

Considerando el motor de avance, la estimación del deterioro de las condiciones de corte de la herramienta, podría hacerse entonces fácilmente a partir de los cambios en la corriente que pasa por dicho motor, al incrementarse el término M_L .

Tratando el tema de la medida de la corriente eléctrica surge una nueva cuestión a considerar: su forma de onda. Dado que la alimentación de estos motores se hace en forma pulsante a través del circuito de control, no podremos hablar de valores instantáneos de la corriente sino de valores medios. Por otra parte esto no es un obstáculo si lo que queremos es detectar el progresivo embotamiento de la herramienta para reemplazarla antes de que tenga lugar su rotura.

Para hallar la potencia eléctrica se ha realizado una multiplicación analógica de la corriente instantánea que pasa por el motor de avance por la tensión, también instantánea, que existe entre sus terminales. Las razones por las que se ha realizado así en lugar de hacer una multiplicación digital una vez muestreadas las señales de tensión y corriente se exponen a continuación.

En primer lugar, con fines experimentales, es más interesante observar la señal con la que se quiere trabajar, que obtenerla a partir de un proceso en el cual puede perderse información por desconocimiento de lo que va a hallarse. En efecto, en el proceso de digitalización no solo es importante no violar el teorema de Shannon, también hay que prestar un especial cuidado al número de muestras que se deben tomar. A través de la multiplicación analógica nosotros encontramos en la potencia instantánea componentes de baja frecuencia que no podían haber sido previstas.

En segundo lugar, un cálculo digital de la potencia instantánea exigiría dos canales de adquisición y una frecuencia de muestreo lo suficientemente alta como para asegurarse que la componente fundamental y los principales armónicos de la señal muestreada son registrados. Recuérdese que aún usando motores de corriente continua y trabajando en condiciones estacionarias, por el modo de alimentación pulsante, la tensión y la corriente eléctricas pueden contener relativamente altas componentes en frecuencia.

Finalmente indiquemos que al ser la potencia instantánea variable con el tiempo el parámetro que más sentido tiene utilizar es su valor medio. Analógicamente el cálculo de valor medio puede realizarse con un filtraje adecuado. Si se desea realizar ahora un tratamiento digital de esta potencia media, la

frecuencia de muestreo tendrá un valor bajo. El cálculo del valor medio de la potencia, si ésta hubiera sido calculada digitalmente, podría hacerse de una forma también muy simple, pero no podría reducirse la frecuencia de adquisición. En efecto, dado que el valor medio de un producto no es igual en general al producto de los valores medios, no podrían hallarse analógicamente el valor medio de la corriente y de la potencia, muestrearlos a baja frecuencia y posteriormente multiplicarlos.

Hemos visto en el capítulo anterior la existencia de algunos sensores fundados igualmente en la medida de la corriente eléctrica o en la medida de ésta y de la tensión. Las diferencias de éstos con él que se propone en esta memoria son las siguientes:

- Sólo uno de ellos evalúa como el nuestro dos variables: potencia y par, pero lo hace a partir de tres: tensión, corriente y velocidad, mientras que nosotros lo hacemos a partir de dos aprovechando las características de los motores de imán permanente, que son los más extendidos en las máquinas-herramienta dotadas de Control Numérico. Este método no es solo más sencillo sino también más exacto, ya que por un lado, intervienen menos variables, y por otro, el cálculo del par a través de la potencia eléctrica lleva inherente el error debido a las pérdidas de conversión de energía eléctrica a mecánica.

- Mientras que el resto de los sensores miden sus variables en el motor principal, nosotros lo hacemos en el motor de avance con lo que nuevamente esperamos obtener mayor sensibilidad para detectar el deterioro de la herramienta de corte.
- En el caso de emplear un tratamiento digital, la multiplicación analógica simplifica la circuitería de digitalización y reduce enormemente la frecuencia de muestreo, lo cual puede resultar ventajoso en muchos casos.

3.2. PRIMER PROTOTIPO

Con el fin de realizar los ensayos preliminares se diseñó un sensor para evaluar la potencia media consumida por el motor de avance. En la figura 3.2 puede verse su circuitería. Consta de dos etapas de acondicionamiento de señal, una constituida por un divisor de tensión, realizado con resistencias de precisión, para reducir a un nivel adecuado el voltaje en los terminales del motor, y otra constituida por un amplificador operacional en configuración no inversora para amplificar la tensión existente en los extremos de una resistencia intercalada y tener, de este modo, una tensión proporcional a la corriente instantánea que pasa por el motor. Una vez acondicionadas las señales de tensión y corriente son multiplicadas analógicamente con el circuito integrado MC 1495L. La salida de este multiplicador de cuatro cuadrantes representa la potencia instantánea, pero como dicha salida está en forma de corriente modo diferencial, un amplificador operacional, llamado de desplazamiento de nivel, la cambia a una tensión en modo común. A continuación es filtrada, eliminando de este modo la componente de 100 Hz y sus armónicos que provienen del sistema de control del motor. La señal obtenida representa la variación temporal del valor medio de la potencia eléctrica.

Para suministrar la tensión de alimentación del sensor

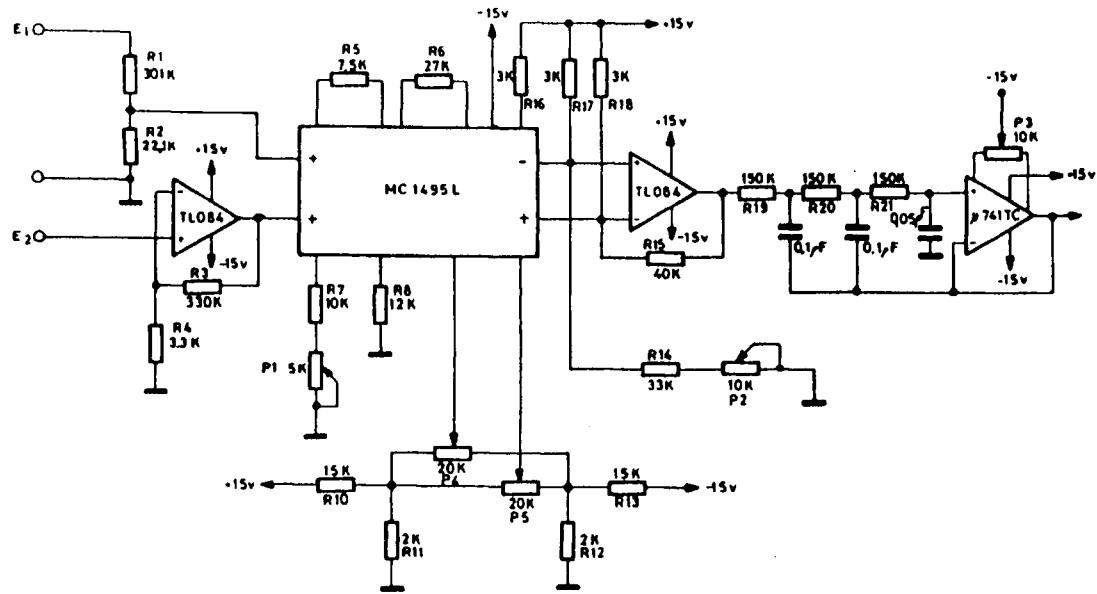


Fig.3.2 Sensor de potencia. Primer prototipo

se diseñó una fuente estabilizada lineal de $\pm 15V$. Su esquema, que puede verse en la figura 3.3., es el clásico: transformador con toma central, rectificador de onda completa utilizando un único puente de diodos, reguladores de tensión y elementos de filtrado para bajas y altas frecuencias.

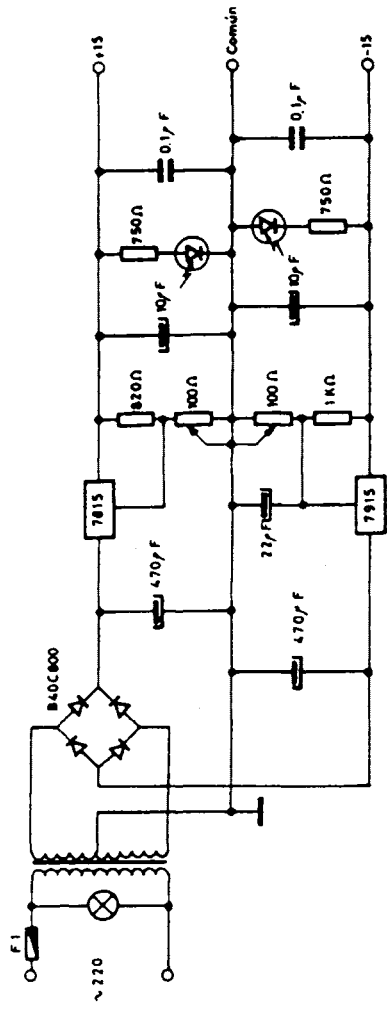


Fig. 3.3 Fuente de alimentación. Primer prototipo

3.3 CONFIGURACION DEL SISTEMA DE ENSAYO PRELIMINAR.

Para la realización de los ensayos se eligió un torno, debido por una parte al uso generalizado que tiene este tipo de máquina y por otra, para que permitiera realizar pruebas de larga duración sin introducir bruscas discontinuidades. Por otro lado, la geometría de la herramienta es más sencilla y los resultados pueden generalizarse posteriormente a herramientas de múltiple filo.

El torno de que se dispuso fue uno de tipo convencional de la casa CUMBRE dotado de un único motor trifásico de 1420 r.p.m. y 2 CV. Por las razones antedichas en el epígrafe 3.1., se instaló en el torno además un motor de corriente continua e imán permanente marca Mavilor de 400 W. y 127 cm.N de potencia y pares nominales. Este motor fue el encargado de realizar el movimiento de avance.

Para generar la tensión de alimentación de este motor y controlar su velocidad se instaló igualmente un circuito de control Infranor monofásico, bidireccional. Su diagrama de bloques puede verse en la figura 3.4. En él, cuatro tiristores montados en antiparalelo rectifican la tensión de la red que proviene del transformador de potencia. La reactancia que se coloca en serie con el motor tiene por objeto limitar los picos de corrien-

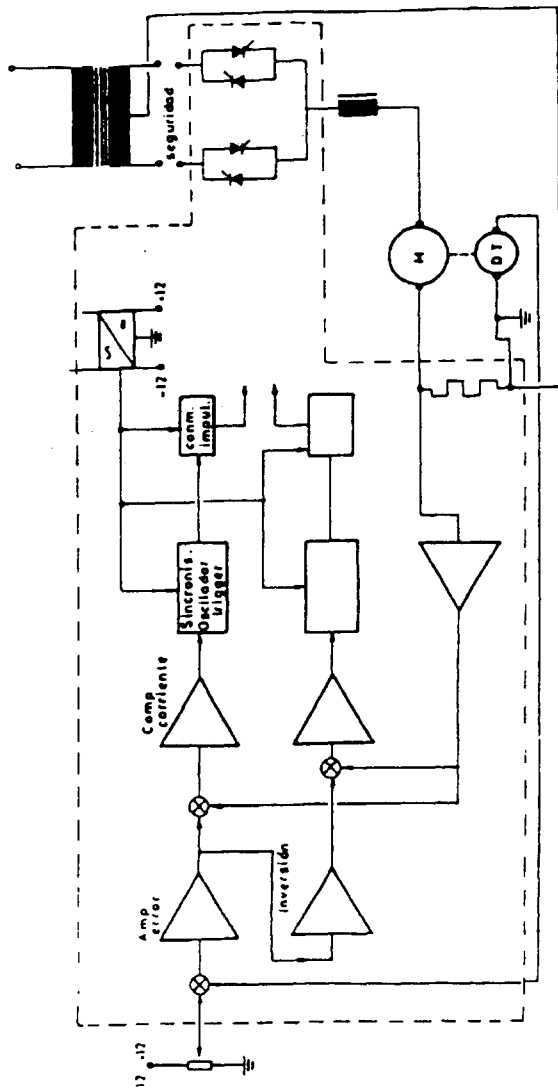


Fig.3.4. Esquema del Sistema de Control

te excesivos que puedan producir la desimanciación del motor y mejorar el factor de forma de la tensión pulsante de alimentación. Observese que el par útil es proporcional a la corriente media, mientras que el calor disipado, el cual limita el funcionamiento del motor, es proporcional a la corriente eficaz.

El control de velocidad se realiza comparando la tensión de consigna con la generada por una dinamo tacométrica. Con la señal de error obtenida se realiza la acción de control, gobernando el ángulo de disparo de los tiristores, con lo que se obtiene una tensión variable de alimentación al motor. Parte de la circuitería esta duplicada para controlar los dos sentidos de giro. Además, se realiza un control de par máximo midiendo la corriente que pasa por el motor usando una resistencia en serie con él.

En la figura 3.5 se ilustran los puntos en donde se tomaron las señales de entrada al sensor. La tensión proporcional a la corriente que pasa por el motor se midió entre B y C y la tensión del motor se midió entre A y C. No existe inconveniente en medir la tensión del motor entre estos puntos en lugar de hacerlo entre A y B ya que al ser la resistencia "shunt" muy pequeña la diferencia de potencial entre B y C es despreciable frente a la que hay entre A y B. La resistencia debe ser necesariamente pequeña, no sólo para no introducir errores, sino porque al pasar por ella grandes corrientes hay que prestar atención al calor que disipará por efecto Joule. Se eligió el punto

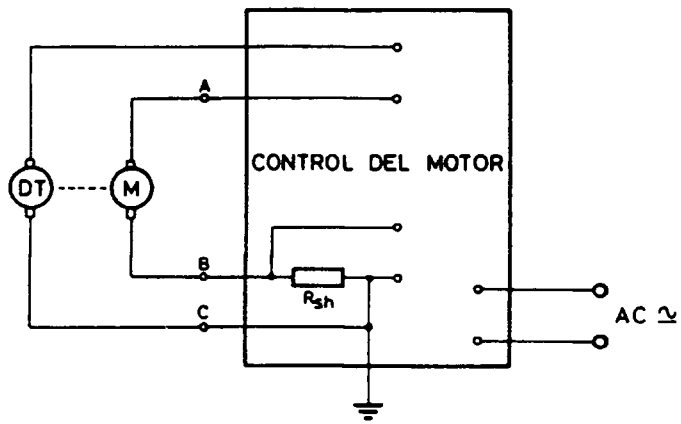


Fig.3.5 Puntos de medida del sensor

C como referencia de las señales de entrada al sensor, en lugar del B, para que aquél fuera común tanto al sensor como al circuito de control y para que las señales medidas de tensión e intensidad tuvieran el mismo signo.

Como se ve en la misma figura, la propia resistencia del circuito de control fue también aprovechada para que el sensor midiera la corriente instantánea del motor.

La salida del sensor, esto es la potencia media consumida, fue medida con un osciloscopio programable de memoria digital y con capacidad para procesar formas de onda; también fue llevada a un registrador gráfico. La figura 3.6 muestra todo el conjunto. Los resultados obtenidos con este primer diseño serán comentados en el apartado correspondiente.

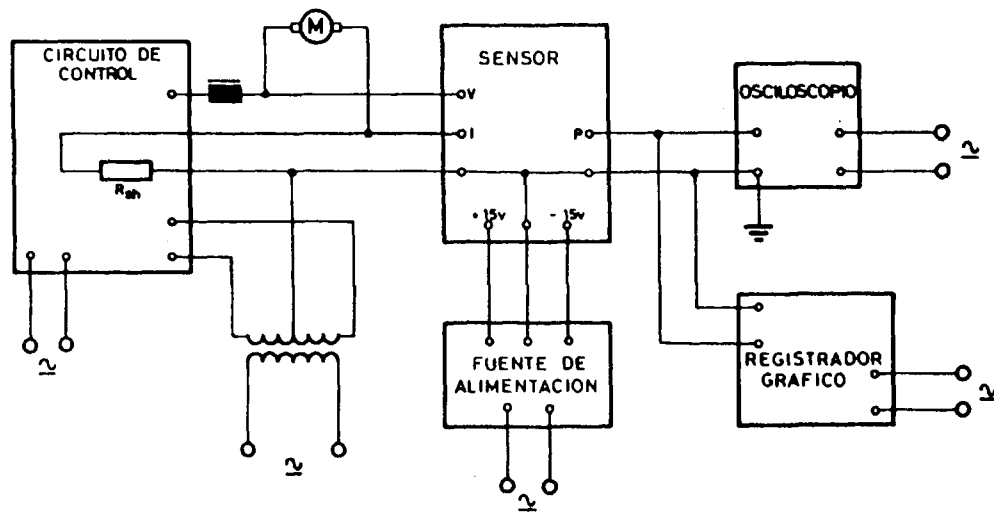


Fig. 3.6 Disposición del equipo experimental

3.4 SENSOR DE POTENCIA Y CORRIENTE ELECTRICA.

Tras realizar los primeros ensayos con el sensor descrito, y vistas sus interesantes posibilidades, se concibió un nuevo sensor más completo, más exacto y en el que algunos parámetros fueron cambiados para adecuarlos al proceso observado. Los detalles de estos cambios son descritos a continuación. En la figura 3.7 puede verse el diagrama de bloques y en la 3.8 el esquema del nuevo diseño.

En primer lugar se tomó el criterio de utilizar el amplificador operacional OP-07 para todas las partes importantes del circuito. Este amplificador operacional de instrumentación se caracteriza por una tensión de "offset" ultrabaja debido a que presenta a su entrada un circuito de amplificación transistores bipolares no "chopeado" de bajo ruido. Por otra parte la deriva del "offset" con el tiempo y la temperatura son muy bajas y las corrientes de polarización muy pequeñas.

La captación de la corriente y tensión del motor se realizó igual que en el caso anterior a través de una resistencia "shunt" y un divisor de tensión.

Las ganancias de las etapas de acondicionamiento de señal fueron también modificadas de acuerdo con : los primeros

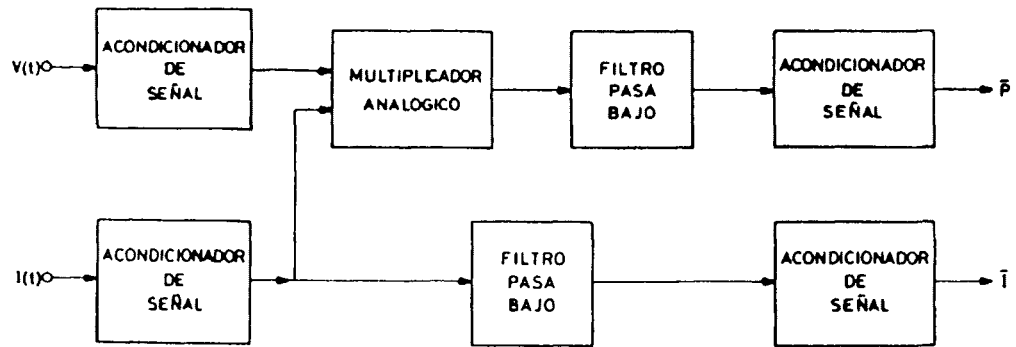


Fig.3.7 Diagrama de bloques del sensor de potencia y corriente eléctrica

resultados, las características del motor dadas por su fabricante y el factor de forma de la tensión y corrientes de alimentación del motor. La ganancia de la entrada de tensión fue aumentada, y se realizó ahora el divisor de tensión utilizando un potenciómetro de ajuste, lo que permite realizar posteriores cambios con facilidad. La ganancia de la entrada de intensidad fue por el contrario reducida y se utilizó la configuración inversora del operacional para evitar posibles problemas de interferencias debidos a la alta impedancia de entrada de la otra configuración. También se disminuyeron los efectos de las corrientes de polarización colocando una resistencia del valor adecuado en la entrada no inversora del operacional.

A pesar de que las ganancias de ambas etapas de entrada al sensor fueron estudiadas en base a mediciones y características del fabricante del motor resultó imposible predecir con exactitud el valor óptimo de aquellas. En efecto, no sólo habría que predecir los máximos valores de velocidad, par y potencia que serían necesarios cualesquiera que fueran las condiciones del ensayo, sino que también habría que relacionar aquellos con los valores de pico de corriente e intensidad que son los que podrían ocasionar errores en la salida del mutiplicador, o incluso daños irreversibles en este.

Hay que empezar considerando que la velocidad y el par útil del motor se relacionan con los valores medios de la tensión y corriente mientras que la potencia lo hace con los valores

eficaces. Por medio de las características del motor, las cuales están dadas para valores de corriente continua de valor constante, podríamos estimar aproximadamente los valores medios máximos de tensión y corriente. Sin embargo, la relación entre el valor de pico y el valor medio de estas magnitudes no es constante en nuestro caso y debe ser hallada experimentalmente; debe tenerse presente que el factor de forma, razón del valor eficaz al valor medio, depende del ángulo de disparo cuando se utiliza un sistema de control por recorte de la tensión de red /132/.

Teniendo en cuenta que la sobreexcitación del multiplicador debida a los picos de las formas de onda de tensión y corriente no puede ser detectada a la salida del sensor por el filtraje que se realiza, resultó necesario diseñar dos indicadores de sobreexcitación de modo que mediante un par de LED's se indicase si alguna de las entradas al multiplicador superaba los diez voltios; positivos para la entrada de corriente y negativos para la de tensión, de acuerdo con el signo que tienen estas entradas en nuestro conexionado. Los indicadores de sobreexcitación están constituidos por un detector de pico activo seguido de un comparador que lleva al transistor que le sigue de forma inmediata a las zonas de corte o saturación provocando de esta forma el encendido de aviso del LED. Los amplificadores operacionales ahora no necesitan ser de la calidad de los OP-07 por lo que un TL084, con cuatro operacionales por pastilla, fue usado.

El detector de pico activo, por su alta impedancia de

entrada, no carga el circuito de medida. En él, no se colocó ninguna resistencia para realizar la descarga del condensador, la cual se acaba realizando a través de su misma resistencia de fugas y las corrientes de polarización del amplificador operacional que le sucede. De este modo el tiempo de descarga, y por tanto el de LED encendido, se alarga; además la capacidad del condensador puede disminuirse con lo que se logra que en la carga de éste se demande menos corriente del operacional que le antecede. No obstante, dicha capacidad no debe reducirse excesivamente por la razón que a continuación se expone. El tiempo que permanece iluminado el diodo depende de:

- El tiempo en el que la señal sobrepasa los diez voltios,
- la capacidad del condensador, y
- el valor de pico de la señal que supera los diez voltios.

Si la cresta de la señal chequeada supera sólo ligeramente la tensión límite y durante un tiempo muy breve, el LED puede no brillar apenas si la capacidad del condensador es pequeña. Un valor de 4.7 microfaradios resultó adecuado.

En este sensor se utilizó para medir la potencia el multiplicador de cuatro cuadrantes ICL8013, que a su buen precio

añade las ventajas de un menor error porcentual en su resultado que el usado anteriormente, la necesidad de una circuitería exterior más sencilla y el llevar incorporado en la misma pastilla el amplificador operacional de desplazamiento de nivel. Por el contrario, encontramos en su salida pequeñas inestabilidades de origen térmico, que fueron reducidas mediante el uso de un radiador con una buena inercia frente a cambios de temperatura. Como ya se ha indicado los valores máximos de entrada al multiplicador fueron de 10 voltios frente a los 5 voltios del diseño anterior, valores a considerar a la hora de diseñar las etapas de acondicionamiento de la señal de entrada al sensor. La ganancia del multiplicador y los "offset" de sus entradas y su salida se ajustan con cuatro potenciómetros por un procedimiento cíclico.

A la salida del multiplicador se colocó un filtro Butterworth de segundo orden, con una frecuencia de corte de 0.3 Hz. Esta frecuencia fue mucho más baja que en el caso anterior para eliminar las componentes de baja frecuencia debidas a los elementos de la cadena cinemática del torno que habían sido detectadas con el primer prototipo del sensor.

A continuación la salida del filtro es amplificada para aprovechar al máximo el rango dinámico del aparato de medida. La ganancia de esta etapa se determinó nuevamente por un procedimiento mixto teórico-experimental.

El diseño del sensor también fue ampliado para obtener

la corriente media de alimentación del motor y tener por tanto una indicación del par mecánico ejercido por el motor. Para ello la tensión proporcional a la corriente, tras ser acondicionada, es filtrada para hallar su valor medio y nuevamente acondicionada para aprovechar el rango dinámico del voltímetro digital utilizado para medirla. El filtro utilizado fue nuevamente un Butterworth de segundo orden con la misma frecuencia de corte.

Fácilmente el circuito podría haber dado el valor medio del par en lugar del valor medio de la corriente considerando las características del motor (figura 3.1). Solamente habría que restar el valor de la corriente correspondiente a un par nulo; lo cual puede ser llevado a cabo realizando, con el mismo operacional de acondicionamiento de la señal de salida, un sumador no inversor para restar el valor deseado. Al no haberse podido contar con los medios adecuados para medir con precisión este valor se prefirió dejar como parámetro medido por el sensor la corriente media.

En cada salida del sensor fue colocada una resistencia para cargar un poco el último amplificador operacional, que de otro modo sólo vería la muy alta impedancia de entrada del aparato de medida, y para presentar un camino de baja impedancia a las inducciones que se pudieran presentar en los cables de medida. También fueron colocados dos diodos Zener en oposición para evitar que unas salidas del sensor muy altas dañaran al multiplexor que le seguía en la cadena de medida.

3.5 SISTEMA MULTISENSOR COOPERANTE.

Dado que ninguna variable ha podido ser utilizada para resolver los problemas de supervisión del mecanizado de forma satisfactoria, y que, con toda probabilidad esto seguirá ocurriendo en el futuro, ya que cada variable tiene sus propias particularidades que la hacen idónea para unas tareas e inconveniente para otras; dado que para la aplicación del Control Adaptativo y para una supervisión mucho más completa del proceso, con fines a realizar un mecanizado sin intervención humana es preciso conocer el estado de diferentes variables; y dado que pudiera ser interesante sacar información cruzada de distintas variables, se han diseñados otros sensores complementarios con el fin de configurar un sistema multisensor. Los sensores utilizados han sido de fuerza de avance, de temperatura media de corte y de emisión acústica. Los dos primeros aprovechan el conocimiento ya adquirido con este tipo de sensores en un taladro /55/, /56/, /107/, /109/. El último se encuentra en fase de investigación inicial por lo que no se darán resultados de él.

3.5.1 Sensor de esfuerzos

Se ha diseñado una estructura (figura 3.9) que colocada en la torreta del torno sujeta la herramienta permitiendo medir,

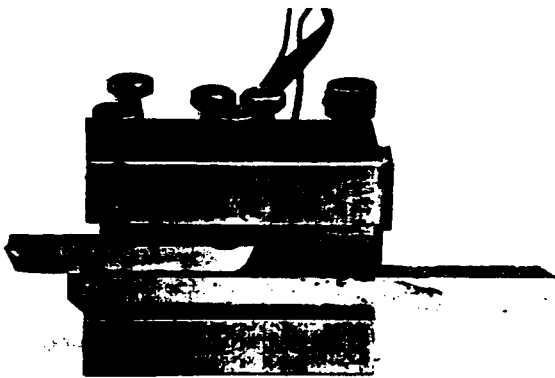
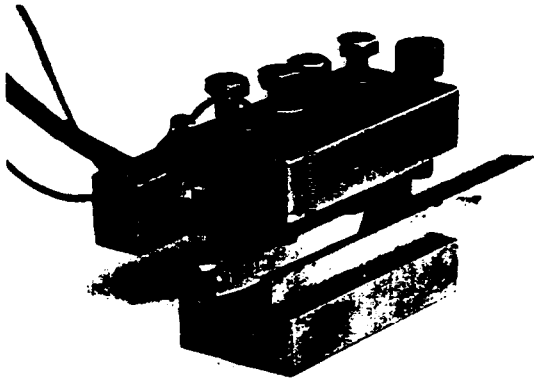


FIG. 3-9: Estructura mecánica del sensor de esfuerzos.

mediante la adecuada colocación de un puente de galgas, los esfuerzos de corte /107/. Por las razones que se han explicado con anterioridad, la colocación de las galgas se hizo de modo que se pudiera medir la fuerza de avance. La alimentación del puente se hace a través del circuito que puede verse en la figura 3.10, con él se consigue una alimentación estabilizada y corregida respecto a la caída de tensión y acoplo de interferencias en los cables que necesariamente deben ser bastante largos. La corriente es suministrada a través de un transistor de potencia controlado por un amplificador operacional, el cual realimenta su salida directamente desde el puente de galgas a través de un hilo por el que no circula apenas corriente, por ir exclusivamente a la entrada inversa del operacional. De este modo se consigue mantener en el puente la tensión de referencia fijada por diodos Zener.

El circuito electrónico, figura 3.11, que mide el desequilibrio del puente está constituido por tres operacionales configurados con la estructura de amplificador de instrumentación. Esta configuración presenta las ventajas de: 1) impedancia de entrada alta y simétrica para ambas entradas y 2) ganancia ajustable por medio de una única resistencia. Para reducir la dependencia de su C.M.R.R. con el grado de apareamiento de las resistencias, éstas fueron elegidas por parejas entre un numeroso grupo de resistencias de precisión que fue pacientemente medido. A la salida del amplificador de instrumentación se coloca un filtro Butterworth de segundo orden con una frecuencia de corte ligeramente más alta que antes, para observar mejor el comporta-

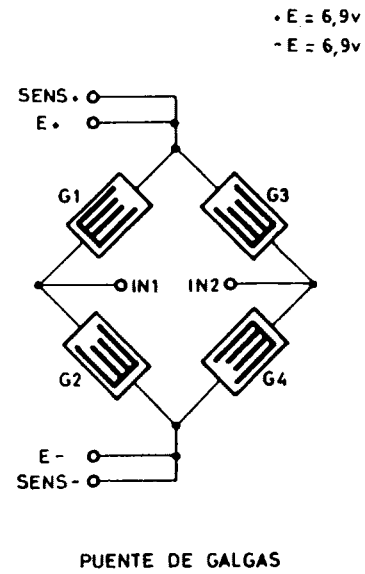
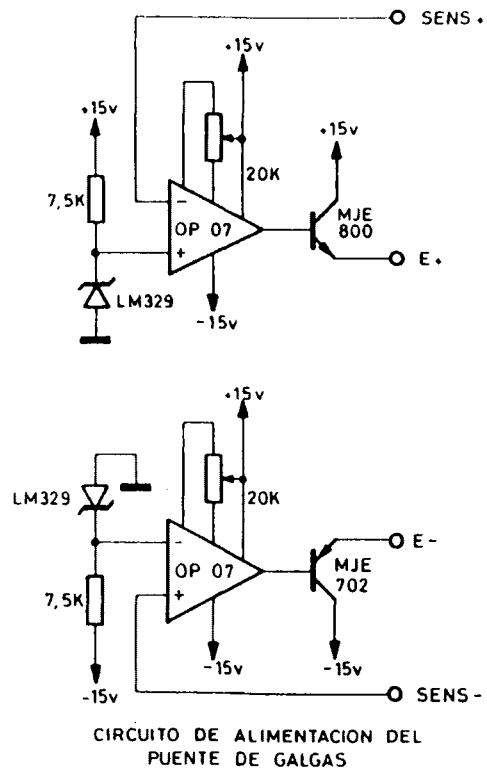


Fig.3.10 Puente de galgas y Circuito de alimentación

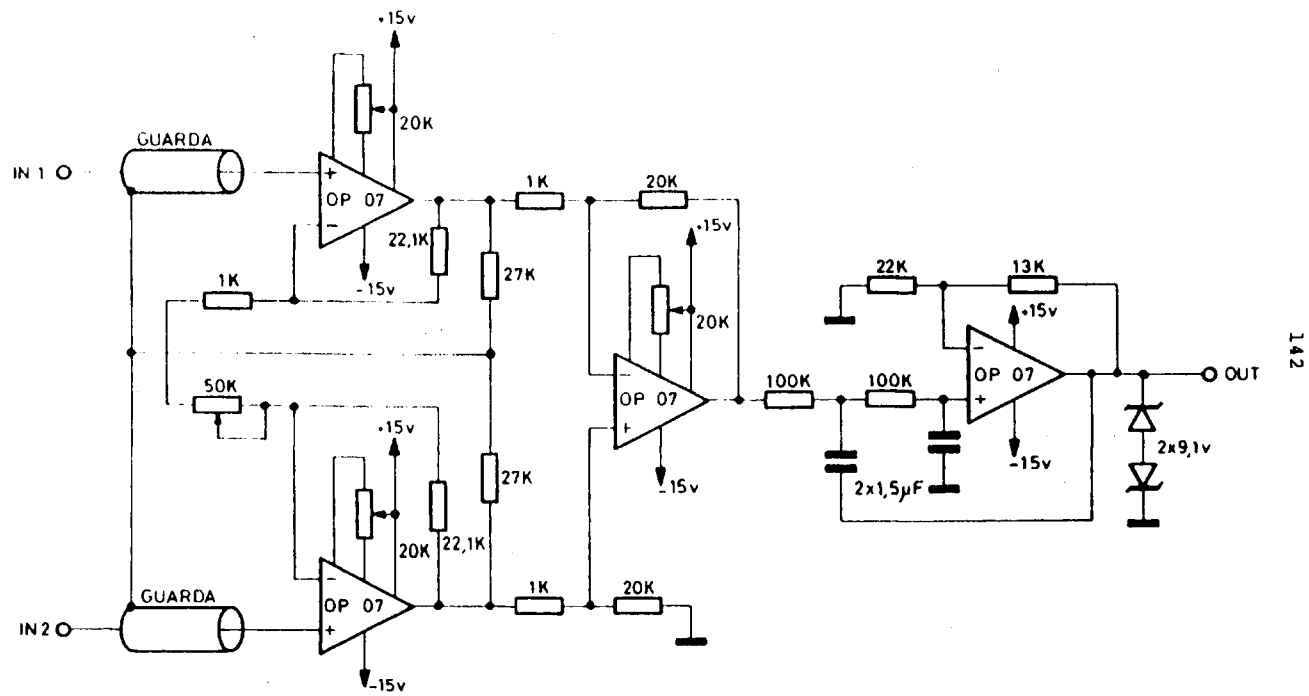


Fig.3.11 Sensor de esfuerzos

miento dinámico de la fuerza de avance.

Para la realización del sensor se utilizaron los operacionales OP-07 por las mismas razones que se apuntaron en la descripción del anterior, aunque ahora la señal a medir fuera menor que antes. El haber usado un operacional con aún un mejor "offset", como el ICL7652 estabilizado por "chopper", y dado que se desea en el futuro estudiar la componente de alta frecuencia de la señal de esfuerzo, habría exigido la colocación de un reloj exterior para aumentar el ancho de banda del referido operacional. Pudo comprobarse que si se hacía esto, aparecía en la salida del operacional un ruido no deseable debido al troceado.

3.5.2 Sensor de temperatura.

Hemos visto en el capítulo anterior los problemas que presentan los sensores de este tipo para evaluar el desgaste de la herramienta. Sin embargo, pueden ser usados para cumplir otras misiones en un mecanizado desatendido, como por ejemplo: determinar cuando es preciso el uso de líquido refrigerante, e incluso controlar el caudal de éste.

La medida de la temperatura media de corte fue llevada a cabo aprovechando el termopar formado por la herramienta de corte y la pieza mecanizada. Para ello se diseñó una escobilla (figura 3.12) mediante un semianillo rozante que fue colocada en

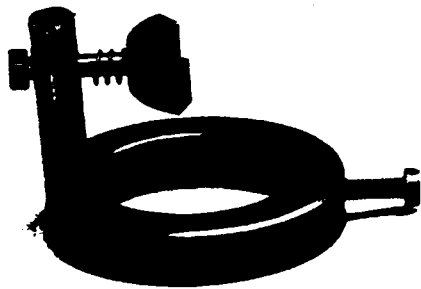


FIG. 3-12: Escobilla para el sensor de temperatura.

el punto giratorio. Por otro lado, el útil fue aislado eléctricamente del portaherramientas, a la vez que hacía firme contacto con una lámina de cobre. Desde ésta y la escobilla se llevaron los hilos de medida al sensor. Las soldaduras de referencia se hicieron por tanto en la lámina y la escobilla y su temperatura fue la del ambiente.

La tensión de termopar es medida mediante el circuito de la figura 3.13. En él la señal es en primer lugar amplificada por el ICL7652, un operacional estabilizado por "chopper" que presenta una tensión de "offset" y una estabilidad de éste notablemente mejores a los del OP-07. A continuación la señal pasa a través del amplificador de aislamiento ISO 100 y finalmente es filtrada por un paso baja Butterworth de segundo orden con una frecuencia de corte de 0.4 Hz.

El operacional de aislamiento y la utilización de dos fuentes de alimentación con referencias separadas fueron necesarios debido a que uno de los puntos de medida del sensor es la estructura del torno. Ya que la referencia común a los otros sensores esta unida a la tierra de seguridad de la línea de alimentación, a través de una fuente de alimentación programable, si el aislamiento no se realizase podría haber circulación de corrientes parásitas entre el torno y la tierra de seguridad que falsearían las medidas. Incluso se podría producir daño en los circuitos electrónicos debido a fuertes inducciones en la estructura del torno. Una norma fundamental en compatibilidad electro-

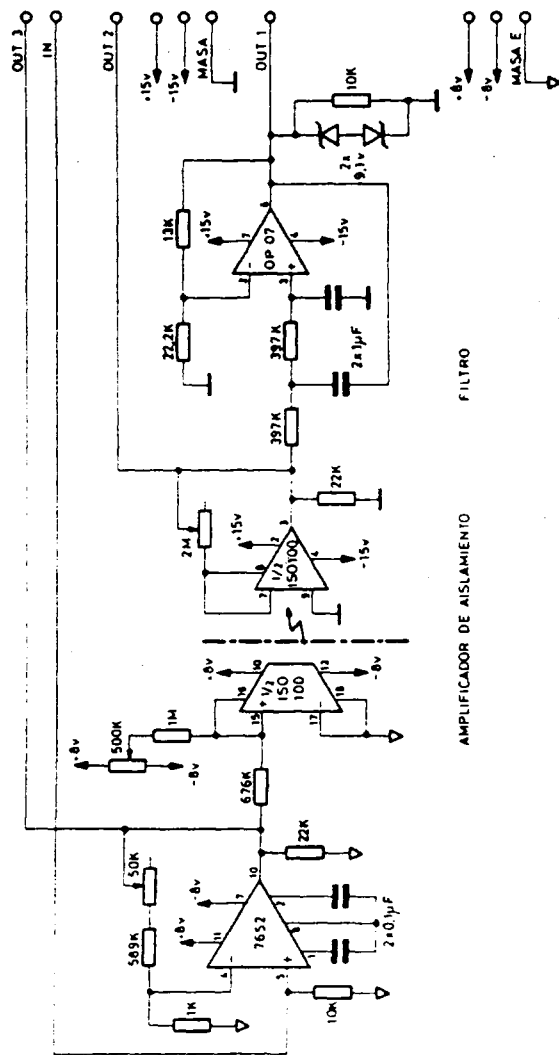


Fig.3.13 Sensor de Temperatura

magnética es no conectar la referencia de un circuito a tierra en más de un punto.

El operacional de entrada usa la configuración no inversora, pero se colocó una resistencia para disminuir su elevada impedancia de entrada.

3.5.3 Fuente de alimentación del sistema multisensor.

Para realizar la alimentación de los circuitos de todos los sensores, incluido el de potencia y par, se diseñó una nueva fuente de alimentación con tres tensiones dobles. Su diseño, figura 3.14, es como el de la anterior. A su entrada se colocó un filtro de red para rechazar las interferencia en modo común y diferencial.

Ninguno de los tres puntos de referencia de la fuente fue en ella unido a la tierra de seguridad de la red, si bien dos de ellos estaban conectados entre sí.

Las tensiones utilizadas fueron las de $\pm 15V$ y $\pm 8V$; reservandose la de $\pm 5V$ para futuros usos.

3.5.4 Otras características del sistema.

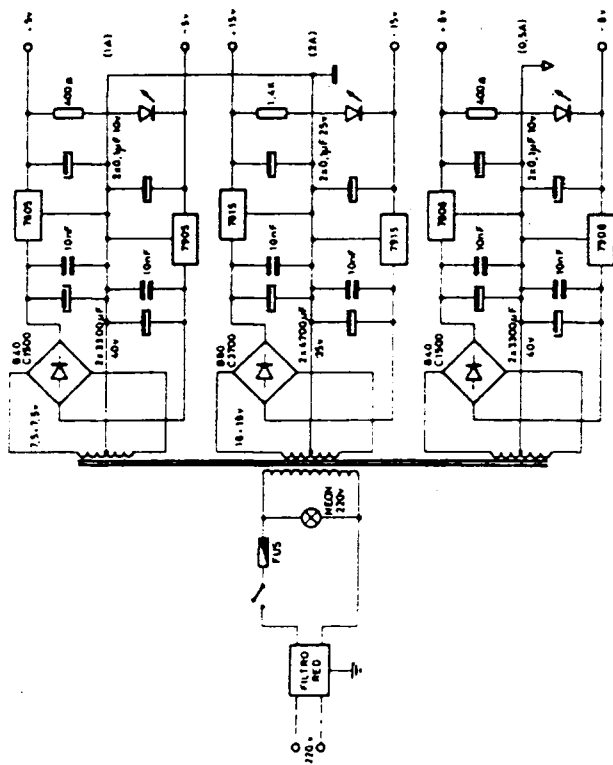


Fig 3.14 Fuente de alimentación del Sistema Multisensor

La electrónica de todos los sensores fue construida en tarjetas de circuito impreso para su colocación en un bastidor. Las salidas de todas ellas fueron normalizadas de modo que estuvieran en el rango de 10 voltios. Igualmente se limitó mediante la colocación de diodos Zener la salida de tensiones positivas o negativas superiores a este valor. Las señales de puntos de prueba se sacaron al frontal de la tarjeta de cada sensor, mientras que las salidas de éstos iban por detrás a un bus analógico, que las conducía al multiplexor. La alimentación de los sensores se realizó también por su conector trasero, el cual además las fijaba al bastidor.

Se prestó un cuidado especial a las técnicas de control de interferencias electromagnéticas, realizando el apantallamiento y trenzado conveniente de los cables de señal. Igualmente fueron usados hilos de guarda /133/.

3.6 SISTEMA AUTOMATIZADO DE ENSAYO Y SUPERVISION DEL PROCESO.

Con la doble finalidad de realizar largas series de ensayos fiables y repetitivos, que involucran grandes volúmenes de datos, y la de construir un banco experimental que permita la continuación de los trabajos aquí presentados, se configuró un sistema de adquisición de datos y control cuya descripción se hace a continuación. En la figura 3.15 se presenta todo el conjunto.

3.6.1 Máquina-herramienta y sistemas de control.

Para la realización de las pruebas se utilizó el mismo torno que en los ensayos preliminares (figura 3.16), realizando en él nuevas modificaciones. Ya se ha indicado que la frecuencia de corte del filtro usado en el sensor de potencia, y con ella las de los otros sensores, fue disminuida en el segundo diseño para eliminar las componentes debidas a las velocidades de giro de los diferentes elementos de la cadena cinemática. Con el mismo fin la transmisión del motor de avance a la Caja Norton fue realizada con dos únicas ruedas y una correa dentada (figura 3.17). Por otra parte, para poder realizar ensayos con velocidad de corte superficial constante, independientemente de la disminución del diámetro de la probeta durante el cilindrado, el motor trifá-

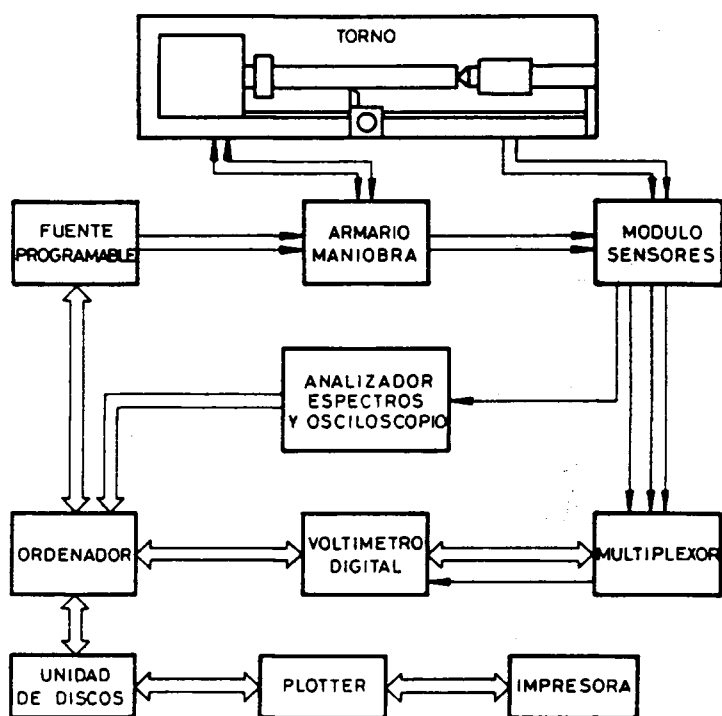


Fig. 3.15 Sistema integrado para la evaluación de las condiciones del mecanizado

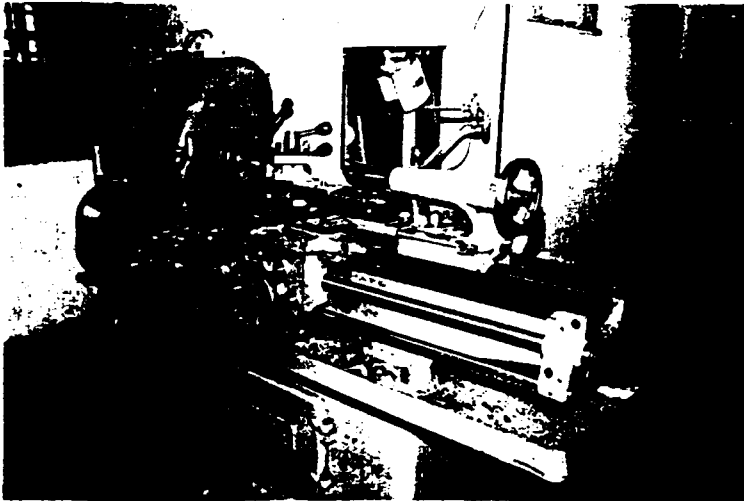


FIG. 3-16: Máquina-herramienta utilizada.

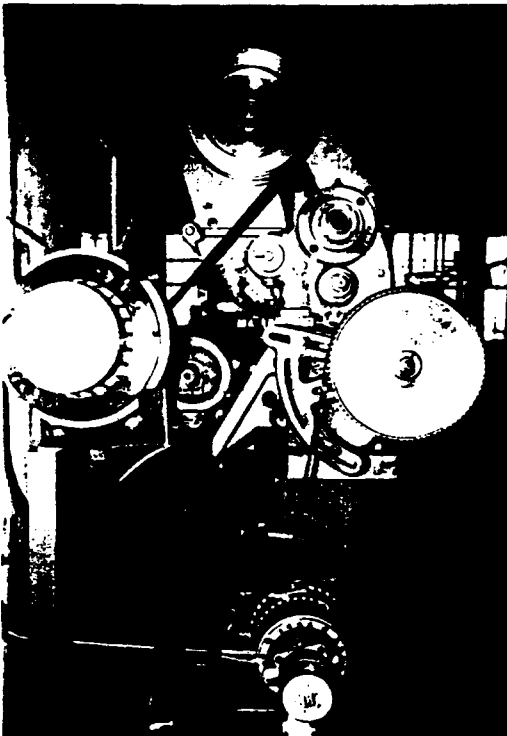


FIG. 3-17: Detalle de los motores instalados.

sico original del torno, cuya función había sido reducida a generar el movimiento del husillo principal, fue sustituido por otro de corriente continua, imán permanente y baja inercia para generar el movimiento del husillo principal. Se empleó un motor Mavi-lor de 2150 W y 355 cm.N. Para controlar su velocidad se empleó un circuito de control, como el descrito para el motor de avance, con su correspondiente reactancia, transformador, dinamo tacomé-trica e interruptor-limitador de seguridad.

3.6.2 Gobierno de los sistemas de control.

Los circuitos de control, los limitadores, las reactan-cias y el transformador del motor pequeño fueron alojados en un armario de maniobra (figuras 3.18 y 3.19) que permite realizar el gobierno de los motores de tres formas distintas:

- manual,

- local, y

- remoto.

Con el control manual todo el torno vuelve a funcionar como originalmente lo hacía: todo el movimiento se genera a partir de un único motor; solo que ahora en lugar de utilizarse el original se usa el segundo que instalamos, colocándole por medio

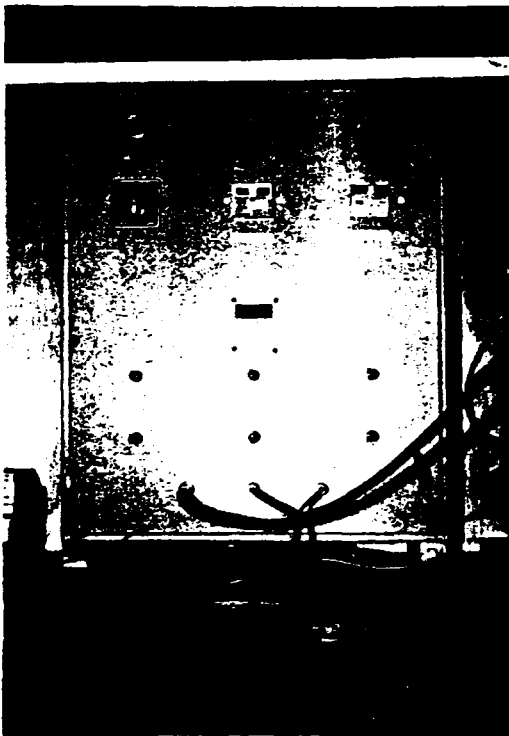


FIG. 3-18: Panel del sistema de mando.

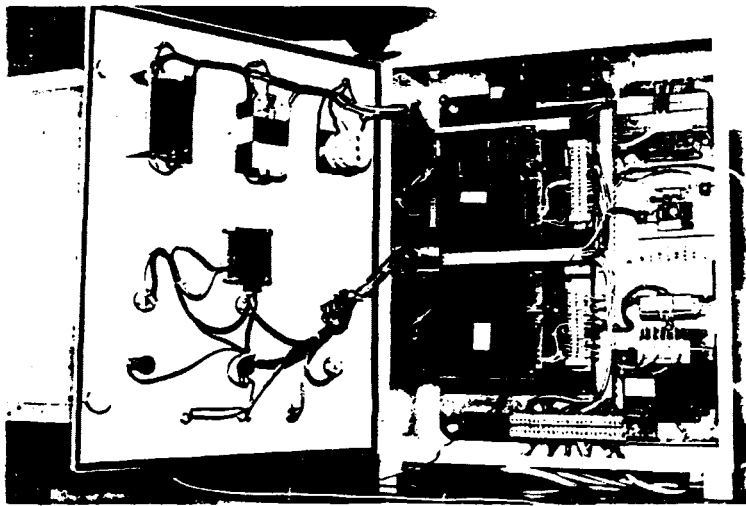


FIG. 3-19: Interior del armario de maniobra.

del sistema de control a las 1420 r. p. m. de aquél. El motor de avance queda inhibido. Los pasos discretos de velocidades y avances vuelven a ser seleccionados por el operario de la máquina mediante los juegos de engranajes y transmisiones. Igualmente aquél puede seguir usando su mando de marcha-parada y elegir el sentido de giro.

Con el mando local, el gobierno completo de los dos motores se hace desde el armario de maniobra. Sus velocidades de giro pueden ser ahora seleccionadas de forma continua e independiente mediante dos potenciómetros.

El control remoto tiene las mismas características, solo que ahora los motores son controlados por ordenador. Una fuente de alimentación programable recibe, a través del bus IEEE-488, las órdenes oportunas y genera para los controles de velocidad las tensiones de consigna adecuadas.

En el armario también se instaló un voltímetro digital para visualizar las velocidades de los motores. Su esquema puede verse en la figura 3.24. A él llegan las señales de los tacómetros. Un conmutador situado en el frontal del armario permite seleccionar el motor del que se desea conocer la velocidad. A la entrada del voltímetro la señal es acondicionada mediante un divisor de tensión, el cual mediante un nuevo conmutador puede dar la lectura de la velocidad dividida por dos o por cuatro, en el caso de que ésta tenga más de tres dígitos. El resto del vol-

tímetro está constituido por un conversor analógico-digital, un conversor de BCD a siete segmentos y un visualizador de tres dígitos. La corriente para los LED se suministra a través de un transistor. Para alimentar el voltímetro se diseñó una fuente lineal de 5 V. como las anteriores descritas.

En el frontal del armario se encuentra igualmente, con el interruptor general, un freno de emergencia para el motor de avance, los conectores para las entradas de las tensiones de mando y el conector para las salidas del sensor de potencia y corriente eléctricas. El interior fue refrigerado mediante un ventilador.

El transformador del motor principal dado su gran volumen y peso fue alojado en lugar aparte.

3.6.3 Módulo electrónico de los sensores.

Las tarjetas de los circuitos electrónicos de acondicionamiento y preprocesamiento de señal fueron alojadas en un bastidor (figura 3.20) de modo que se pudieran realizar cambios con facilidad. La fijación mecánica se hizo mediante guías y el conector trasero de cada tarjeta, por el cual además se realiza su alimentación y se sacan las salidas de los sensores hacia el sistema de medida.

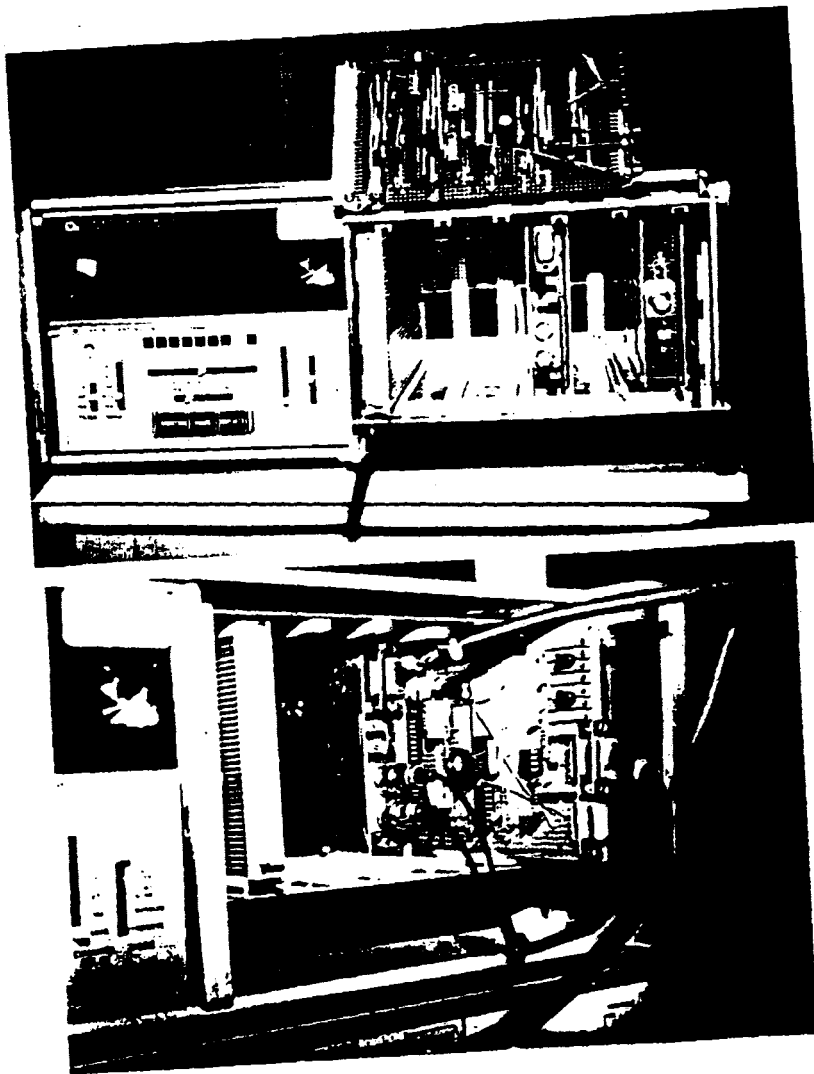


FIG. 3-20: Multiplexor y módulos electrónicos de los sensores.

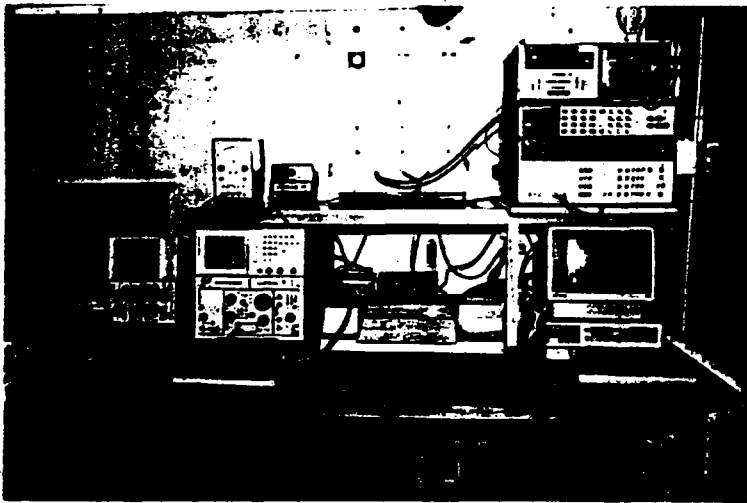


FIG. 3-21: Instrumentación empleada.

3.6.4 Instrumentación de medida.

La instrumentación usada fue toda ella programable y fúe controlada desde un ordenador HP 9816 (figura 3.23). Los programas desarrollados serán comentados en el siguiente apartado.

Como ya se ha indicado, para generar las tensiones de mando de los motores se utilizó una fuente de alimentación programable (HP 4140B, figura 3.22). En realidad el instrumento usado es también un picoamperímetro y la parte de fuente programable que tiene no es muy versátil ya que está pensada para ayudar en las medidas que se hacen con la otra parte. Un estudio cuidadoso de las posibilidades del aparato y de las condiciones de nuestros ensayos permitió sacar un buen partido de ella. De hecho los programas de ordenador desarrollados permiten realizar ensayos que han sido planeados para el futuro, como por ejemplo acelerar el desgaste de la herramienta mediante cambios bruscos en el avance, o estudiar la respuesta a entradas en escalón. No creemos que sea conveniente aquí pormenorizar los intrincados detalles del control por ordenador de este aparato, así como el de los otros instrumentos, pues ello puede ser únicamente de interés para los usuarios de un sistema igual. Digamos simplemente que el ordenador, según las condiciones de mecanizado que haya elegido el usuario, programa una serie de parámetros de la fuente y cuando el ensayo lo requiere acelera o frena los motores

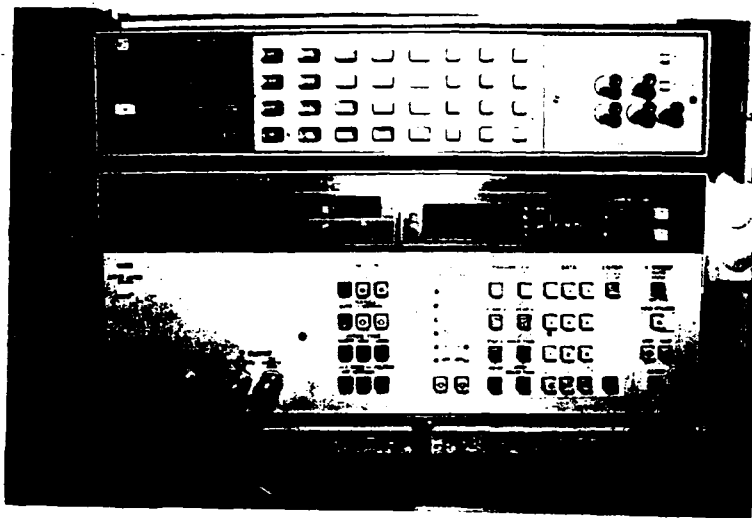


FIG. 3-22: Voltmetro y Fuente de Alimentación Programable.

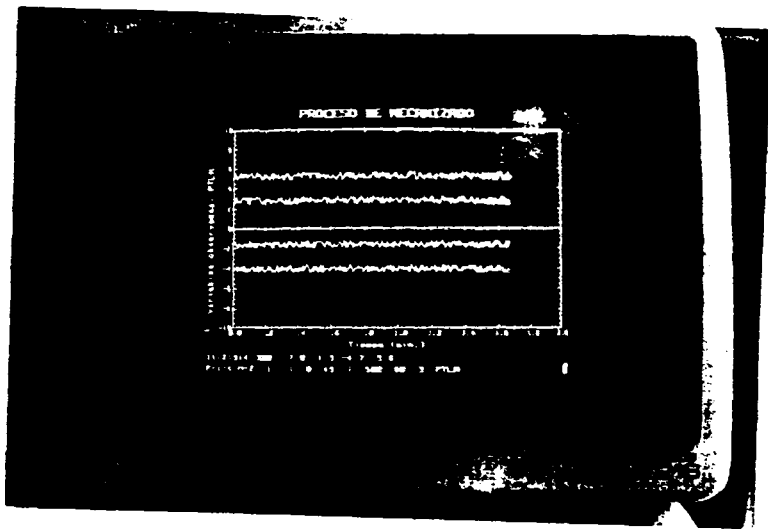


FIG. 3-23: Computador.

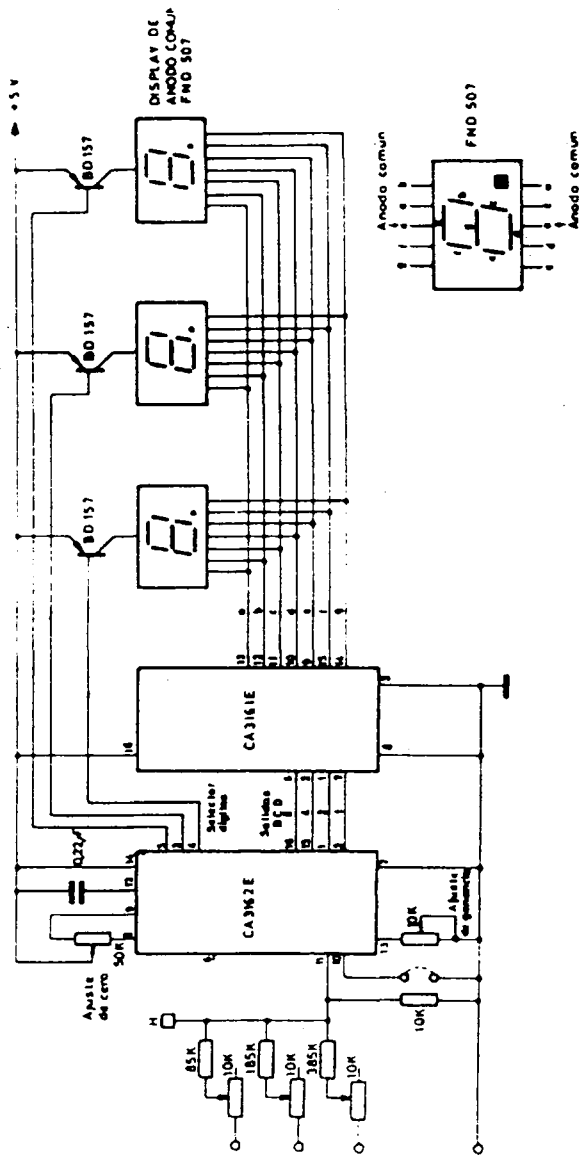


Fig 3.24-Esquema electrónico del Voltmetro Digital

del torno poniéndolos a la velocidad conveniente.

Para la tarea de adquisición de datos el ordenador programa previamente los parámetros convenientes de un multímetro digital (HP 3456A, figura 3.22), como por ejemplo: el rango, la clase de la magnitud a medir, el tiempo de integración, el número de lecturas por disparo, lo que depende del número de variables a medir, etc. A continuación y cuando el proceso de mecanizado está teniendo lugar, una interrupción controlada por el reloj del ordenador según la frecuencia de muestreo deseada, lleva el control del programa a una subrutina de medida. Con ella se ordena al voltímetro digital que realice un ciclo de adquisición y este, tras cada medida efectuada, provoca un salto de canal en el multiplexor. A continuación las medidas de todas las variables son enviadas al ordenador que las presenta en pantalla en tiempo real. Las medidas son convertidas a valores enteros, para optimizar el aprovechamiento de memoria, y almacenadas temporalmente en la RAM del computador. A continuación el control vuelve al programa principal hasta que tiene lugar una nueva interrupción.

De este modo se realiza la supervisión en tiempo real del proceso de mecanizado.

Para la realización de los ensayos preliminares se utilizó un osciloscopio de memoria digital, programable y con capacidad para procesar señales (TEK 7854). Este instrumento puede realizar por si mismo tareas de adquisición y tratamiento

debido a sus características de programabilidad, ya sea localmente o desde un ordenador. También está siendo usado en la actualidad para los primeros estudios de emisión acústica, junto con un analizador de espectros (TEK 7L12) enchufable en el mismo osciloscopio.

Los periféricos del ordenador usados son: la unidad de discos, para almacenar programas y valores medidos, un trazador gráfico y una impresora.

3.6.5. Programas de aplicación.

Para la realización de los ensayos se han desarrollado varios programas de aplicación. En el segundo apéndice se encuentran sus listados. El programa principal llamado LEA, realiza las tareas de control de la máquina-herramienta, medición de las variables del proceso y supervisión de este en tiempo real.

La primera acción que realiza es la de inicializar su reloj y ciertas variables y condiciones. A continuación genera, en modo silencioso, el gráfico sobre el que en tiempo real podrá verse la evolución de las variables observadas del proceso: potencia, corriente eléctrica, temperatura, etc. Este gráfico es almacenado en memoria de forma que su llamada, cuando una pantalla entera ha sido recorrida por las señales, lo presente de forma instantánea y no sea necesario esperar a que la retícula,

rotulación de ejes, etc. tenga de nuevo lugar. A continuación, se definen las condiciones por defecto del ensayo para las siguientes variables

- Material.
- Herramienta.
- Longitud a mecanizar (mm).
- Diámetro de la barra a mecanizar (mm).
- Velocidad (m/min).
- Avance inicial (mm/vuelta).
- Avance final (mm/vuelta).
- Salto de avance (mm/vuelta).
- Profundidad de la pasada (mm).
- Frecuencia de muestreo (Hz).
- Variables medidas.

Tras esta definición toma el control una subrutina que

bajo forma de menú presenta las condiciones del ensayo y de una forma muy operativa permite realizar cambios. Cuando el usuario da por válidas las condiciones, se realiza un chequeo de éstas, para evitar errores o daños en la instrumentación o en la máquina, y se hallan los valores de:

- las velocidades de los motores,
- las tensiones de consigna,
- la duración del ensayo,
- el retraso entre los saltos si el avance se realiza en escalera,
- el momento en que debe producirse el primer salto si el avance no es constante,
- el número de medidas previstas y
- el número de canales a medir.

Cuando alguna de las condiciones chequeadas no es válida el ordenador indica cual es, he impide continuar hasta que las condiciones no sean válidas individualmente y consistentes en conjunto, dado que están interrelacionadas. Verbigracia: la velocidad del plato depende del diámetro, la velocidad del motor

principal depende de aquella y los avances dependen de esta última.

Los valores definitivos de las condiciones serán posteriormente almacenados en disco junto con las observaciones realizadas.

Seguidamente se hace una primera parte de la programación remota de la instrumentación y se recuerda al usuario las tareas que debe realizar. Después se asigna un número a la experiencia, se acaba la programación remota de la instrumentación y se llevan los motores a la velocidad del ensayo.

A continuación se entra en un lazo infinito del que se sale periódicamente a la subrutina de medida, ya explicada en el apartado anterior, o del que se sale definitivamente cuando el ordenador juzga que el mecanizado ha concluido o el usuario desea acabar la experiencia.

Llegados a esta situación, el ordenador detiene los motores, calcula los valores medios de las medidas y los presenta en pantalla. A continuación, si dispone de memoria suficiente, las reordena por variables; en caso contrario borra una parte de su propio programa, que ya cargará de nuevo cuando lo necesite, y chequea su disponibilidad de memoria nuevamente. Si no es posible reordenarlas lo avisa y ya sean ordenadas por variables o en el tiempo, almacena en disco las observaciones junto con sus valores

medios, el número de medidas y las condiciones del ensayo. Si el disco de datos se encuentra lleno, de forma que los datos no podrían ser guardados enteros, el ordenador solicita un disco nuevo y reasume el proceso de almacenamiento de forma que los datos no se pierdan.

Finalmente se presentan los resultados de la experiencia, se sacan por el trazador gráfico si se desea y se comienza un nuevo ensayo.

Otro programa llamado GRAF-LEA permite obtener representaciones gráficas y listados de cualquier fichero en disco que contenga los datos de una experiencia ya realizada.

CAPITULO IV

EXPERIENCIAS Y ANALISIS DE RESULTADOS

EXPERIENCIAS Y ANALISIS DE RESULTADOS

Se describen en este capítulo los ensayos realizados con el objeto de comprobar el funcionamiento del sistema de supervisión del mecanizado y estudiar las posibilidades de los sensores presentados anteriormente.

Comenzamos reseñando las experiencias llevadas a cabo con el primer prototipo de los sensores de potencia y presentamos aplicaciones encontradas para ellos, que no han sido puestas de manifiesto en otros que operan bajo el mismo principio.

A continuación se relatan las experiencias realizadas para determinar la respuesta del mismo sensor a cambios ocurridos en las condiciones de funcionamiento de la máquina y se comentan los resultados.

Finalmente, se describen los resultados más significativos de un gran número de mecanizados visualizados por medio del sistema de seguimiento del proceso. La información suministrada por los sensores es interpretada y se realiza un estudio crítico del comportamiento de aquellos para cada situación presentada.

La evolución de los parámetros medidos por los sensores se da, en forma gráfica, usándose unidades arbitrarias. Ello se debe a que los valores de cada magnitud dependen del proceso,

máquina, herramienta y material usados y para este estudio tienen sólo interés las variaciones relativas.

4.1 ENSAYOS CON EL PRIMER PROTOTIPO PARA EXTENDER LAS APLICACIONES DE LOS SENSORES DE POTENCIA ELECTRICA.

Evidentemente los sensores de potencia eléctrica descritos en esta memoria pueden cumplir las mismas funciones que los sensores ya existentes de su categoría: detección de presencia de piezas, protección de máquina, herramienta y pieza, Control Adaptativo, etc. Los ensayos realizados con el primer prototipo indicaron nuevas posibilidades como veremos a continuación. Sus resultados han sido ya presentados en un reciente Congreso /91/ y serán también objeto de una futura publicación /92/.

En primer lugar se realizaron experiencias con el motor girando ocioso, esto es transmitiendo su movimiento hasta el husillo de avance, pero teniendo la torreta desembragada. La señal fue medida con el osciloscopio digital, que corría un pequeño programa de adquisición de datos, y un registrado gráfico. En la figura 4.1 puede observarse una muestra típica de la potencia consumida en las citadas condiciones.

Diversos ensayos y medidas permitieron determinar el origen de las componentes en frecuencia de la señal en las velocidades de giro del motor y en las de los restantes elementos de la cadena cinemática. La velocidad de 100 r.p.m. del motor puede

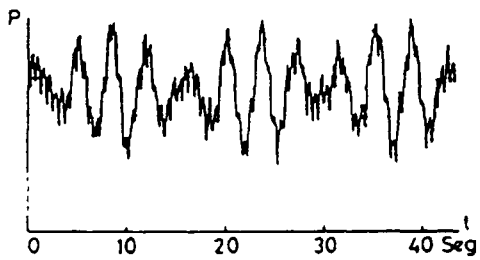


Fig. 4.1 Variación temporal de la Potencia con torreta desembagada

verse claramente en la figura 4.1. De esta observación puede preverse una interesante aplicación para este sensor: si es capaz de detectar los pequeños desajustes o irregularidades de los elementos móviles de la máquina, también podrá detectar la rotura de uno o más dientes de una fresa por las nuevas componentes en frecuencia que aparecerán en su señal. Sería posible incluso, si la sensibilidad fuera suficiente, detectar el deterioro de la herramienta antes de que la rotura tuviera lugar.

Por otra parte, las funciones observadas deben tenerse presentes, si la señal desea ser digitalizada, en la duración del tiempo de muestreo.

Realizando trabajos de desbaste de acero F114 con herramienta de metal duro MP10 se detectó la rotura de ésta por la observación de un gran pico de potencia, seguido de una brusca caída debida a la falta de contacto entre pieza y herramienta, figura 4.2. No obstante, teniendo en cuenta el efecto de filtro paso baja de la inercia de la máquina, la potencia eléctrica no parece ser el método más adecuado de detectar la rotura de la herramienta para realizar un cambio inmediato de ella, evitando en la mayor medida posible daños en la máquina y en la pieza que se está produciendo. Otros sensores pueden ser más convenientes para este propósito, si bien se puede prevenir la rotura observando con el sensor de potencia, o el de corriente, el progresivo deterioro del útil como veremos más adelante.

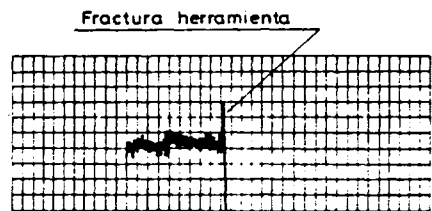


Fig.4.2 Deteccion de rotura de la herramienta

El sensor también detectó problemas en la transmisión del movimiento del husillo de avance a la torreta, con lo que podría ser utilizado para avisar de ciertas condiciones anormales de funcionamiento de la máquina y podría ser empleado en programas de diagnóstico y mantenimiento predictivo estudiando periódicamente su salida para ciertas condiciones normalizadas de funcionamiento de la máquina.

4.2. ENSAYOS PARA DETERMINAR LA SENSIBILIDAD DEL SENSOR Y METODO PROPUESTO

Los ensayos realizados a continuación, tuvieron por objeto determinar la capacidad del sensor para responder a variaciones en las condiciones de funcionamiento de la máquina.

Para ello, en el primer prototipo se disminuyó la ganancia del módulo de acondicionamiento de la entrada de intensidad a un valor de 25, ya que el anterior se había mostrado demasiado grande y se cambió el filtro por el Butterworth que sería utilizado de nuevo en el esquema definitivo. La razón del último cambio fue el deseo de eliminar en lo posible las componentes debidas al motor y a los elementos giratorios de la máquina. La frecuencia de corte elegida fue de 0.3 Hz buscando un compromiso entre velocidad de respuesta y filtrado de frecuencias no deseadas. El diseño del filtro fue cambiado porque el primero, con esta frecuencia de corte tenía un mal comportamiento a altas frecuencias.

Para la realización de las medidas se incorporó el ordenador y el voltímetro digital. El programa desarrollado, sobre el que posteriormente se construiría el que ha sido descrito al final del capítulo anterior, se puede encontrar con el nombre PV en el apéndice 2.

Los ensayos consistieron en realizar tres series de pruebas, en las que primero el motor de avance giraba "ocioso", sin transmitir su movimiento al husillo, luego éste era también movido y, finalmente, la torreta era además desplazada, pero sin realizarse ningún mecanizado. Dentro de cada serie se hicieron ensayos con distintos avances. Posteriormente, y para las mismas tres condiciones, se estudió la respuesta a entradas en forma de escalón, generando la tensión de mando del motor en forma de rampa en escalera.

El sensor mostró suficiente sensibilidad para detectar todos estos cambios. En las figuras 4.3 a 4.13 se presentan, en unidades arbitrarias de potencia, los resultados. Las tres primeras corresponden al giro del motor arrastrando las ruedas de transmisión situadas entre él y la Caja Norton a 100, 300 y 500 r.p.m., respectivamente. En las tres siguientes además, el husillo de avance es impulsado por el motor, las velocidades de éste son las mismas que antes. Las figuras 4.9 y 4.10 muestran la señal medida por el sensor cuando la máquina "corta el aire", esto es cuando la torreta se mueve con la herramienta pero no se mecaniza, girando el motor a 300 y 500 r.p.m. respectivamente.

En las figuras 4.11 a 4.13 se muestra la variación de la potencia consumida por el motor, según es medida por el sensor, cuando su velocidad cambia de 100 a 500 r.p.m. en saltos bruscos. La primera gráfica corresponde nuevamente al giro ocioso del motor, la segunda al mismo movimiento incluyendo, además, al

POTENCIA ELECTRICA

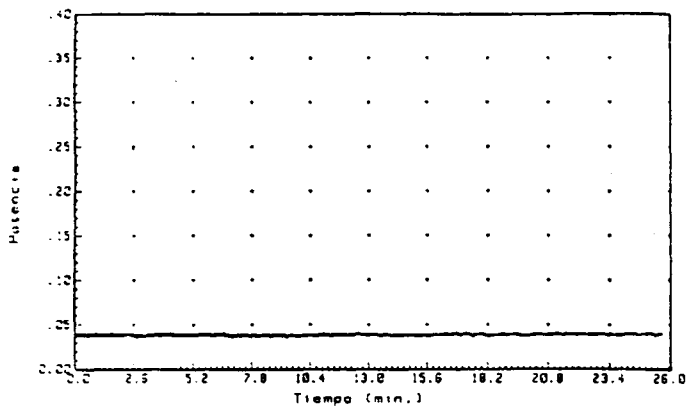


fig. 4.3

POTENCIA ELECTRICA

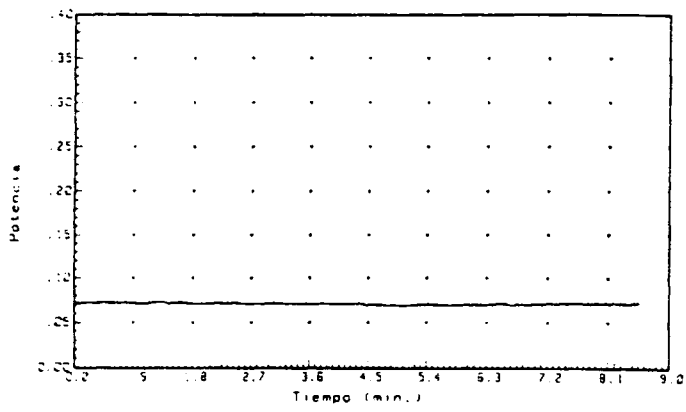


fig. 4.4

POTENCIA ELECTRICA

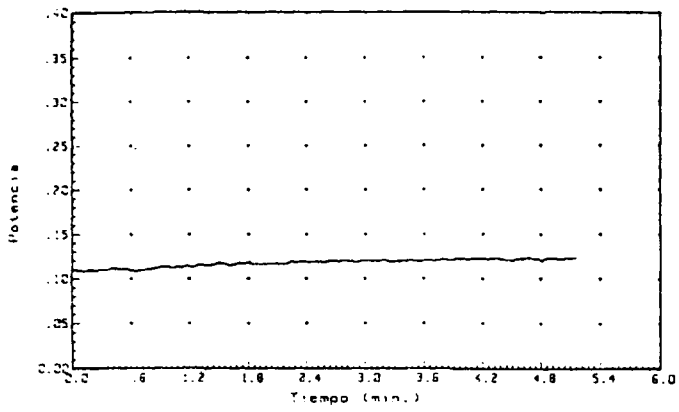


fig. 4.5

POTENCIA ELECTRICA

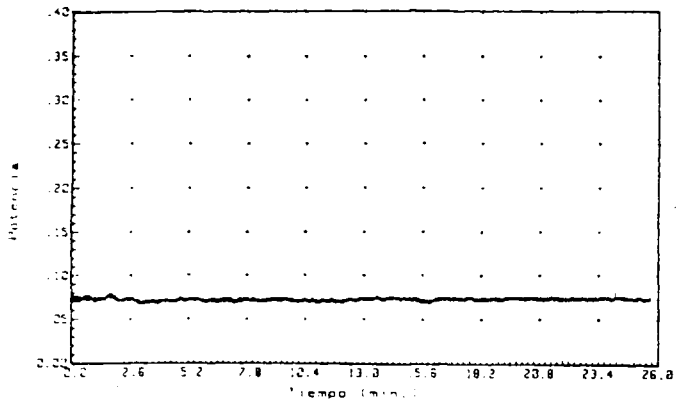


fig. 4.5

POTENCIA ELECTRICA

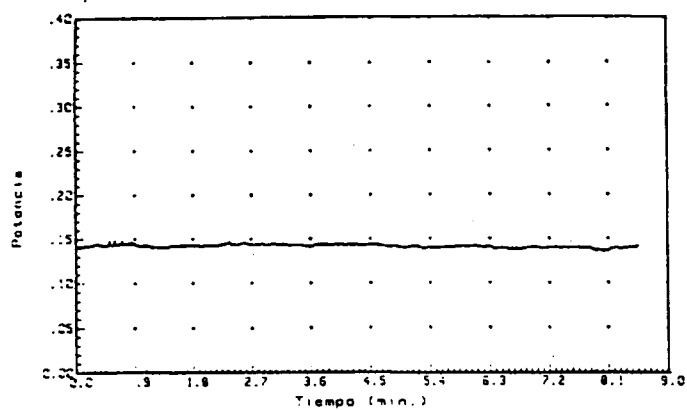


Fig. 4.7

POTENCIA ELECTRICA

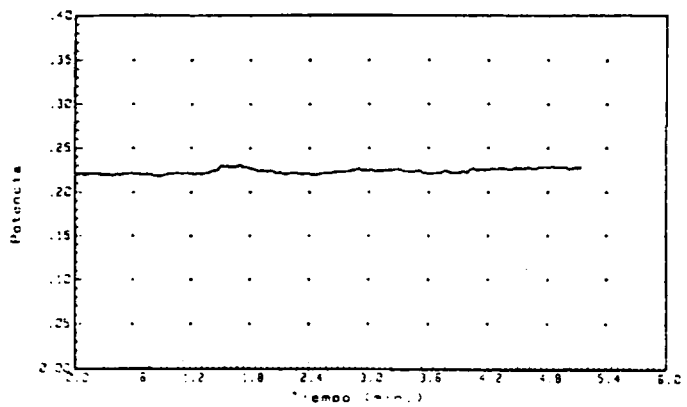


Fig. 4.8

POTENCIA ELECTRICA

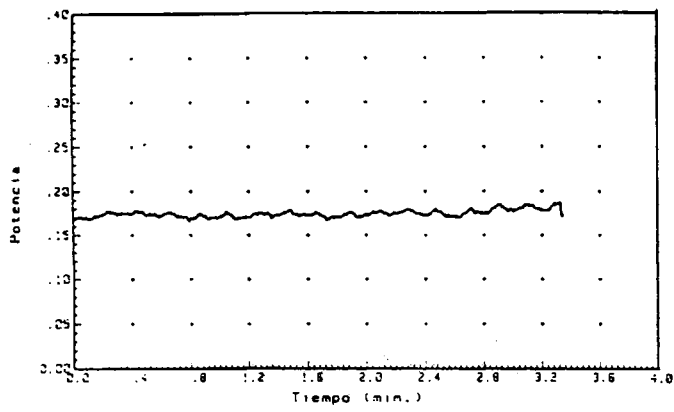


fig. 4.9

POTENCIA ELECTRICA

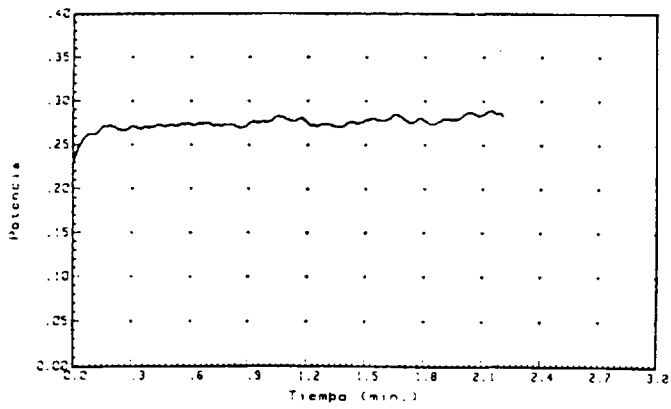


fig. 4.10

POTENCIA ELECTRICA

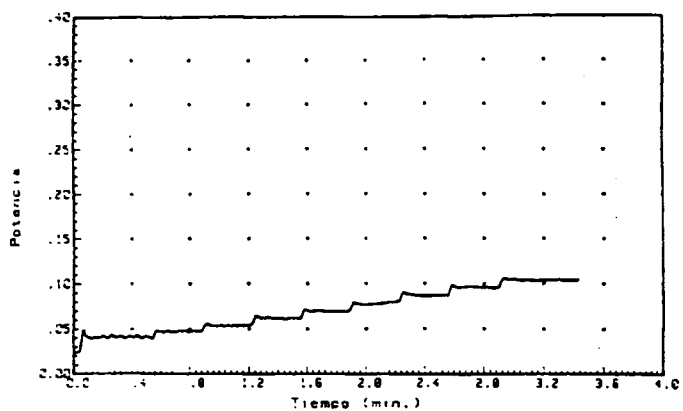


fig. 4.11

POTENCIA ELECTRICA

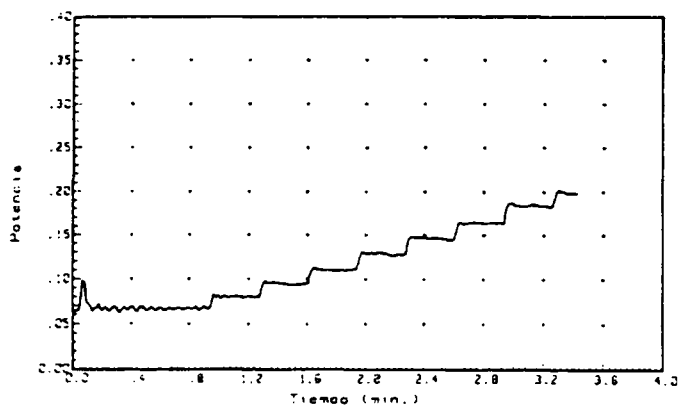


fig. 4.12

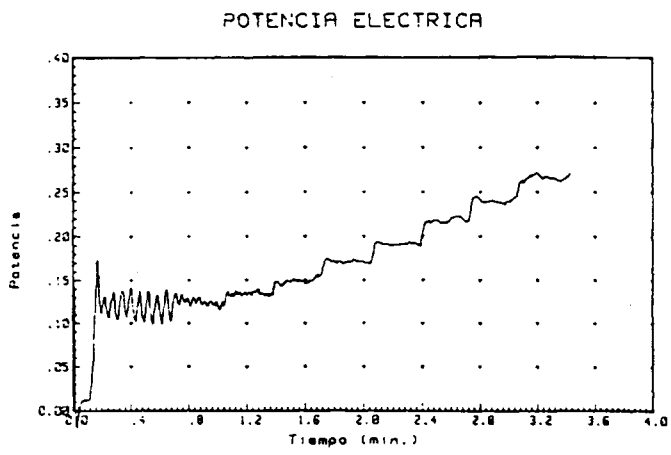


Fig. 4.13

husillo de avance y la última al "corte de aire".

Los niveles observados son concordantes con los incrementos de potencia debidos a aumentos de velocidad o de la carga que debe arrastrar el motor. Los gráficos también muestran como la potencia consumida se hace menos uniforme con estos incrementos.

El ruido también aumenta cuanto más elementos de la máquina intervienen en el movimiento y la aparente disminución de éste con la velocidad, véase, por ejemplo, la figura 4.13, se debe a que sus frecuencias dependen de aquella y al aumentar el filtro las atenúa o elimina. Este incremento de frecuencia y disminución de amplitud puede observarse en los dos primeros escalones de la misma gráfica, en donde la brusca reducción de amplitud se debe a que la principal componente observada pasa de estar por debajo de la frecuencia de corte del filtro (0.3 Hz) a superarla.

A pesar de la disminución llevada a cabo en la frecuencia de corte del filtro aún se detectan frecuencias de giro en la señal del sensor; no obstante, la componente más importante debida al motor mismo ha desaparecido. Por otra parte, a las velocidades típicas del motor durante el mecanizado, todas estas componentes serán fuertemente atenuadas, de modo que el ruido será debido al mecanizado en sí o al inevitable estado de la máquina.

4.3 SUPERVISION EN TIEMPO REAL DEL PROCESO DE MECANIZADO.

Para determinar la validez del método, sensores y sistemas descritos en el capítulo anterior se realizaron largas series de ensayos. La operación escogida fue el cilindrado de probetas de acero F-114, de unos 30 cm. de longitud y 50 mm. de diámetro, con herramientas de acero super-rápido al Cobalto. La dureza de estas últimas estaba comprendida entre 65 y 66 HRC y su geometría fue la siguiente:

ángulo de desprendimiento= 15 grados

ángulo de incidencia = 8 grados

ángulo de la punta = 90 grados

ángulo de inclinación = 0 grados

ángulo de posición = 75 grados

radio de la punta = 0.4 mm.

Las velocidades oscilaron entre 50 y 75 m/s , el avance fue de 0.1 mm./vuelta y la profundidad de corte entre 1 mm. y 0.5 mm.

Todas las condiciones del ensayo fueron elegidas para obtener una duración de la herramienta no muy larga y de acuerdo con lo establecido en la norma ISO 3685 /7/.

Los sensores, máquina-herramienta , instrumentación, programas de aplicación, etc. usados en estos ensayos fueron los detallados en los epígrafes 3.4 a 3.6. A continuación estudiamos los resultados más significativos.

La figura 4.14 muestra la variación simultánea de los distintos parámetros observados: temperatura (T), potencia eléctrica (P), intensidad (I) y fuerza (F). En el transitorio inicial se observa claramente el comienzo del mecanizado, sobre todo en las curvas de temperatura y fuerza, con tiempos de respuesta de 2.5 y 2 segundos respectivamente. La evolución de los parámetros eléctricos es más lenta. En la figura 4.15 puede observarse para estos un tiempo de respuesta de 10 segundos.

Las constantes de tiempo tan altas son debidas a los filtros colocados en las unidades electrónicas. En el caso particular de las variables eléctricas interviene además la respuesta temporal del servocontrol de velocidad. Con un adecuado ajuste en los parámetros del sistema podría detectarse con más rapidez el contacto de la herramienta con la pieza, especialmente con los sensores de temperatura y de esfuerzo.

PROCESO DE MECANIZADO

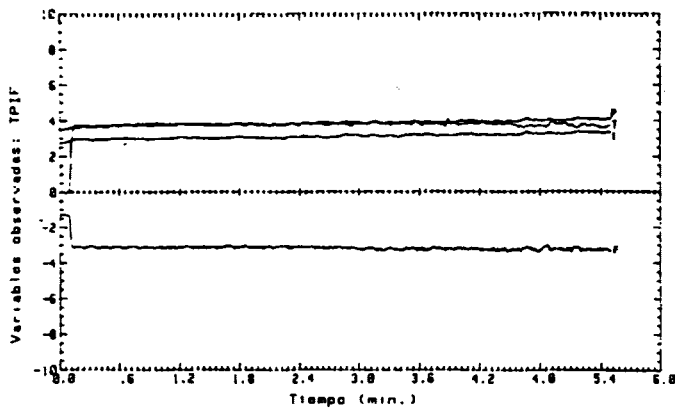


fig. 4.14

PROCESO DE MECANIZADO

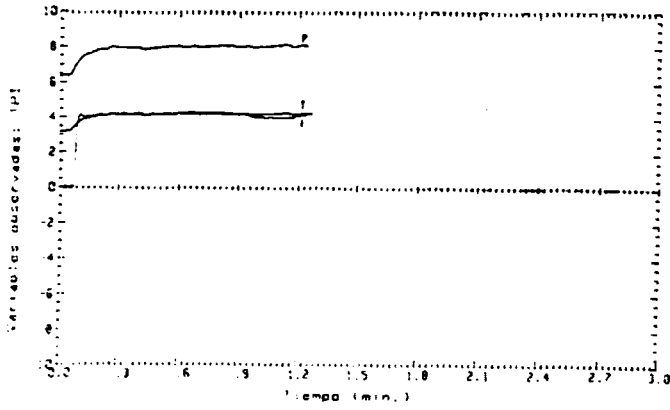


Fig. 4.15

También el escalón de entrada es menos notorio en las señales de tensión y de corriente, debido a que en el momento de comenzar el corte éstas tienen unos valores iniciales debidos al movimiento del motor y los elementos de la cadena cinemática. Hay que hacer notar, además, que solamente una pequeña parte de la potencia eléctrica consumida por el motor y del par mecánico generado por aquél son consecuencia del mecanizado.

En la gráfica de la figura 4.16 se muestra un registro múltiple. En él puede apreciarse una limitación que presenta el sensor térmico. Las fluctuaciones de temperatura que aparecen en las tres últimas cuartas partes de la gráfica fueron ocasionadas por la formación de una viruta de tipo continuo. Cuando ésta alcanza una determinada longitud choca y rebota continuamente con la pieza, torreta y parte fría de la herramienta, provocando breves cortocircuitos del termopar que perturban la señal eléctrica generada. El resto de los parámetros corroboran este hecho, ya que en ellos no se observa variación significativa alguna. Esta particularidad del sensor de temperatura puede, por otro lado, no ser un inconveniente. En efecto, la detección de la formación de viruta no deseada puede ser una información muy útil en un mecanizado desatendido, para que el sistema de control del proceso ejecute las oportunas acciones correctoras.

Las variables eléctricas reflejan determinadas situaciones como un fallo catastrófico de la herramienta que suponga un bloqueo mecánico. En él la potencia y la corriente eléctricas

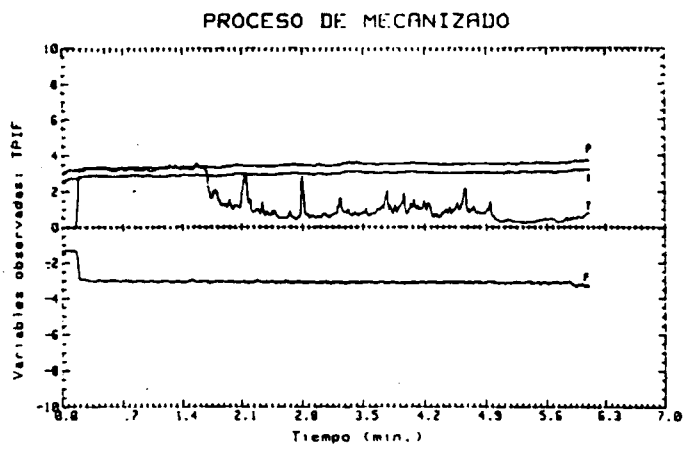


fig. 4.16

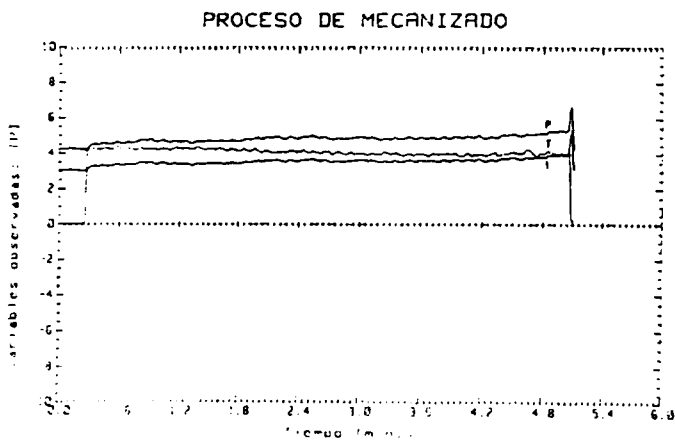


fig. 4.17

se incrementan instantáneamente de forma considerable. Estos impulsos, como el registrado en la figura 4.2, evidencian el final de la vida del útil. En la gráfica de la figura 4.17 se puede observar que, a pesar del proceso de filtrado, la potencia y la intensidad eléctricas alcanzan valores superiores a 1.25 y 1.40 veces sus valores estacionarios. En este caso, debido al bloqueo del proceso, la temperatura no sufre incremento alguno.

Otro caso de rotura, si bien de características distintas, se presenta en la figura 4.18. Al final del registro puede observarse un fuerte incremento térmico, seguido de una disminución importante de los valores de la potencia y de la corriente. Aquí se atribuye la rotura a la aparición de un "punto duro" que origina un aumento de la temperatura. Ello ocasiona un incremento de los fenómenos de oxidación, difusión y adhesión y finalmente provoca un desprendimiento de la punta de la herramienta con la consiguiente pérdida parcial de contacto con la pieza que se está mecanizando.

Existe una estrecha relación entre la potencia y la corriente eléctrica. Vease por ejemplo la figura 4.19. Ello es debido a lo siguiente: la tensión instantánea aplicada al motor es:

$$V(t) = I(t) * R + F_{cem}(t) \quad (4.1)$$

siendo:

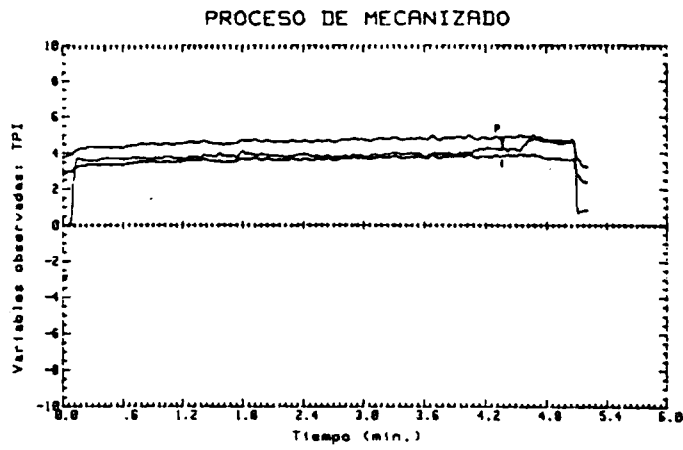


fig. 4.18

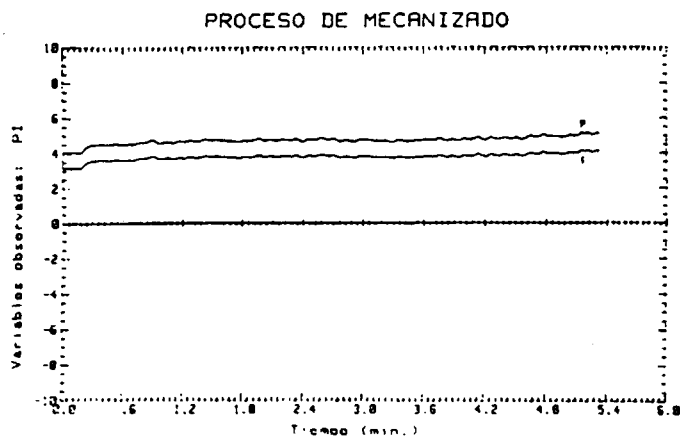


fig. 4.19

$I(t)$ la intensidad de la corriente

R la resistencia del inducido

$F_{cem}(t)$ la fuerza contraelectromotriz.

Un cambio en la carga supone una variación ΔI en la corriente. Si no existiera el sistema de control la velocidad se alteraría, pero por su acción la fuerza contraelectromotriz, que es proporcional a la velocidad del motor, permanece constante y la tensión sufre un cambio:

$$\Delta V = \Delta I * R \quad (4.2)$$

Al ser la potencia eléctrica instantánea el producto de la tensión por la intensidad se comprende la relación entre los registros de la figura 4.19. Las cuales, hay que hacer notar, representan valores medios no instantáneos.

Estudiemos ahora más detenidamente la relación entre ambas curvas. Si se desprecian las pérdidas ($R = 0$) la potencia eléctrica:

$$P_e(t) = V(t) * I(t) = R * (I(t))^2 + F_{cem}(t) * I(t) \quad (4.3)$$

coincide con la potencia mecánica:

$$P_m(t) = F_{cem}(t) * I(t) \quad (4.4)$$

o bien:

$$P_m(t) = M(t) * w(t) \quad (4.5)$$

siendo:

M el par, y

w la velocidad del motor.

Al ser en el motor usado el par proporcional a la corriente y mantenerse su velocidad constante, se concluye que:

$$P_e(t) = k * w * I(t) \quad (4.6)$$

En el caso real, al no ser nulas las pérdidas, la proporcionalidad de la última ecuación sólo puede considerarse como aproximada.

Se concluye de todo ello que la información obtenida de los parámetros eléctricos del sistema multisensor es redundante. Al ser más sencilla y exacta la electrónica del sensor de corriente debería seleccionarse éste. Sin embargo, el conocimiento de la potencia eléctrica consumida también es importante, en un

mecanizado desatendido, para realizar tareas de protección de la máquina. Por otra parte, el sensor de corriente o par es, asimismo, necesario para realizar tareas de protección de herramienta y máquina.

Los parámetros eléctricos no sólo detectan el final de la vida del útil sino también su progresiva degradación. En el comienzo de la gráfica 4.20 se advierte una pequeña fractura de la herramienta. A partir de este punto se comprobaron defectos en el mecanizado, puestos de manifiesto por las fluctuaciones detectadas en sendos parámetros. Medidas dimensionales de la pieza detectaron posteriormente errores de 2 a 4 décimas de milímetro, como corresponde a una herramienta muy desgastada.

Con el fin de estimar, a partir de los parámetros eléctricos evaluados, la fase de su vida en la que se encuentra el útil, se llevaron a cabo ensayos en los que dichas variables fueron registradas desde el comienzo hasta la "caída" de la herramienta.

Las condiciones de la operación permanecieron constantes durante toda la existencia de cada herramienta. Ahora bien, al mantener la velocidad de corte y el avance constantes, la velocidad de los motores debe aumentarse, según disminuye el diámetro de la pieza. En consecuencia la potencia y el par aumentan en cada pasada por efectos ajenos al desgaste del útil. También se observaron incrementos según la herramienta avanzaba,

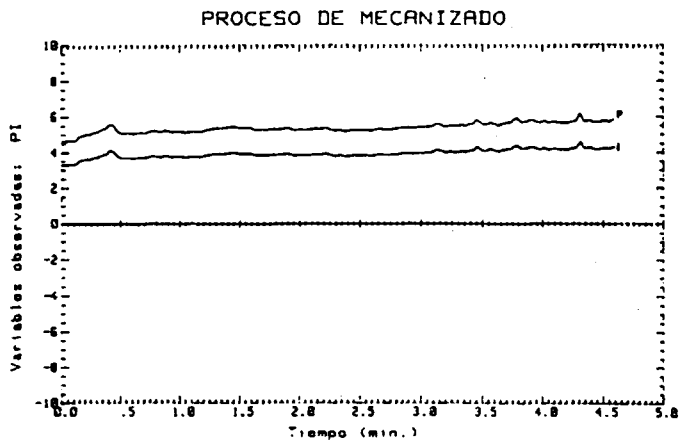


fig. 4.20

atribuibles a defectos de la máquina. Para evitar que estos cambios enmascarasen la estimación del estado de la herramienta que se quería realizar, se llevaron a cabo los mismos ensayos pero sin mecanizar ninguna probeta. A los valores de las primeras pruebas se restaron los niveles de vacío y el ruido resultante, causado por la resta de señales ocurridas en tiempos distintos, fue filtrado digitalmente. Las figuras 4.21 a 4.26 muestran la evolución típica durante la vida de una herramienta de estos valores netos de potencia y par.

En el comienzo del mecanizado, figura 4.21, se produce un desgaste rápido de la herramienta, puesto de manifiesto por un notable incremento de la potencia y el par, los cuales, pasada esta primera fase, empiezan a descender. En esta etapa inicial de la operación la herramienta, a pesar de estar afilada, no corta adecuadamente como es bien sabido.

A continuación, se pasa a una región estable que define el estado óptimo de la herramienta, figuras 4.22 y 4.23. En ella tanto el desgaste como los parámetros eléctricos tienen un crecimiento lento, incluso negativo en el último caso.

Transcurrida esta tercera fase comienza un deterioro de la herramienta que se distingue por un fuerte incremento de la potencia y el par empleados en el mecanizado. El inicio de esta cuarta etapa podría ser utilizado para cambiar el útil y proceder a su reafilado, en aquellos casos en los cuales, de continuar

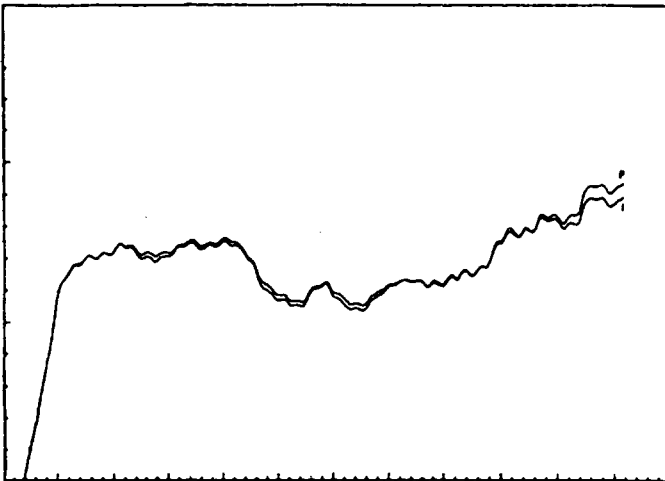


fig. 4.21

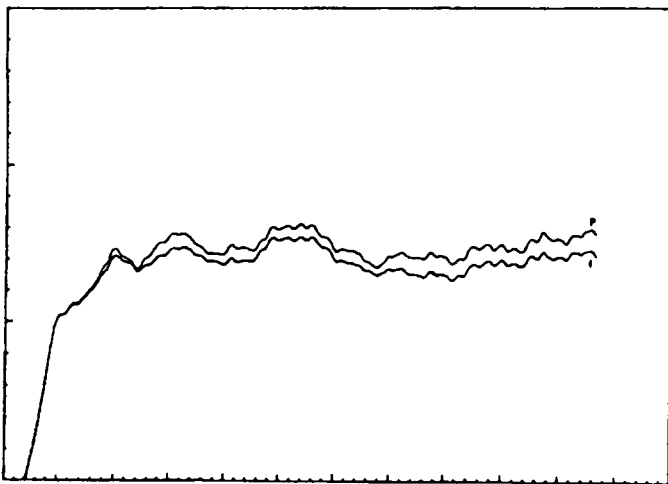


fig. 4.22

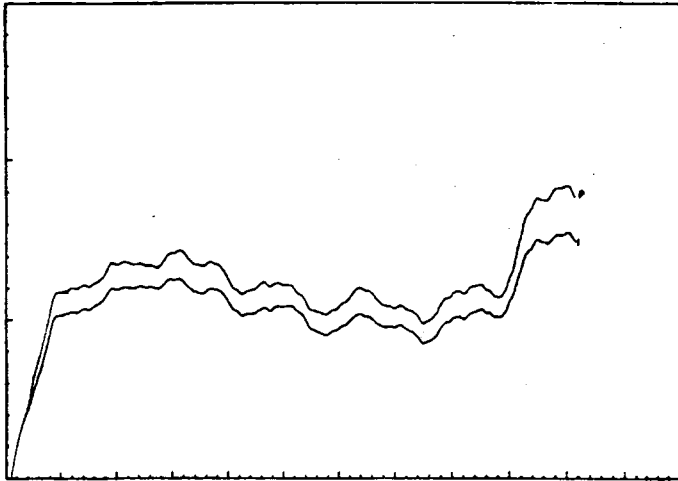


fig. 4.23

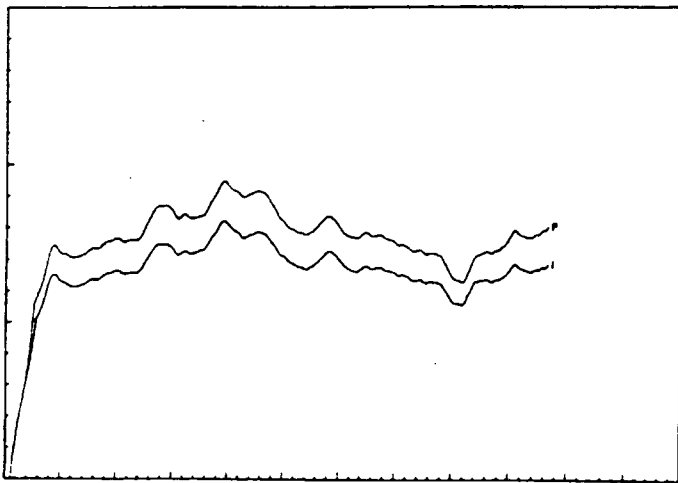


fig. 4.24

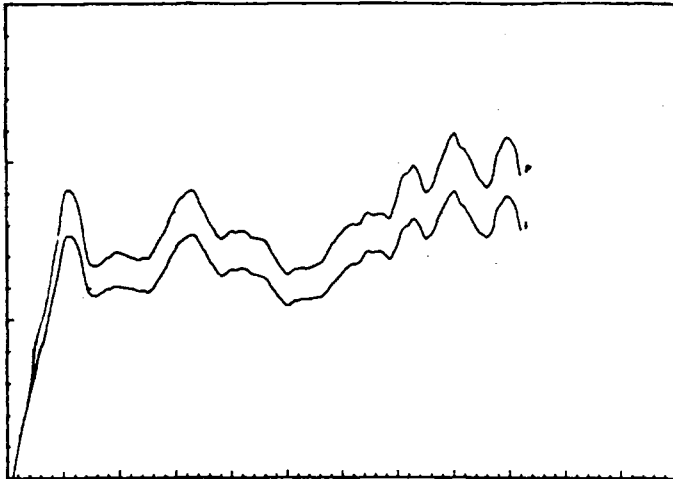


fig. 4.25

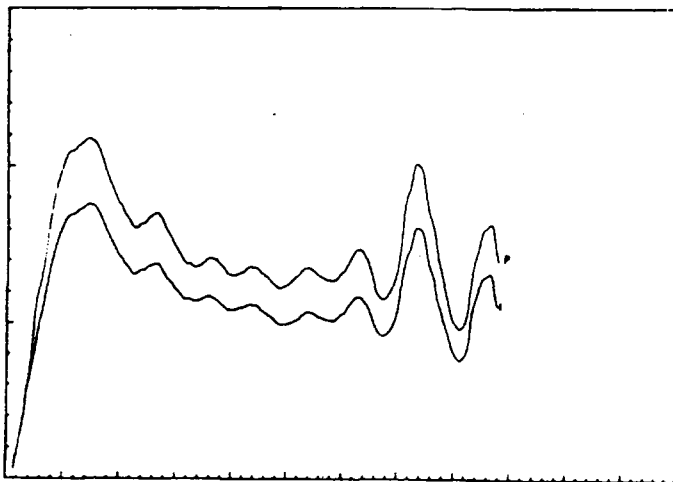


fig. 4.26

usándolo hasta el final de su vida, se dañaría irreversiblemente. Se ha podido constatar que el acabado de la pieza es aún correcto en esta fase, por lo que puede considerarse que todavía se está dentro de la vida útil.

Trás el aumento inicial los niveles se estabilizan, aunque se observa en ellos un comportamiento menos uniforme que antes, figura 4.24. Finalmente tiene lugar un nuevo incremento brusco, que marca el principio de la muerte de la herramienta (fin de su vida útil), lo cual acontece enseguida, figura 4.25.

De seguir operando, la potencia y el par pueden descender, debido a la falta de un buen contacto entre pieza y herramienta, figura 4.26. También se observan fuertes variaciones en los niveles debido a lo irregular del proceso en estas condiciones. Salvo en toscas operaciones de desbaste, no interesa llegar a esta situación, por lo que el último aumento brusco de los parámetros eléctricos puede tomarse como indicación para llevar a cabo un cambio de herramienta automático.

4.4. CONCLUSION

Comentaremos, a modo de resumen de este apartado, que los procesos de mecanizado por arranque de viruta son muy complejos y presentan situaciones distintas para las mismas condiciones. Es preciso por ello, considerar todos los parámetros involucrados. Se ha demostrado que mediante ellos se pueden detectar distintas situaciones: roturas y degradación de la herramienta, contacto entre esta última y la pieza, formación de viruta continua y condiciones anormales del funcionamiento de la máquina. Ello puede permitir a un sistema de control reaccionar adecuadamente ante la presencia de estos eventos.

Asimismo, se ha demostrado que puede reconocerse el estado de la herramienta, por la medición de los incrementos de los parámetros eléctricos respecto a la operación en vacío y mediante sus fluctuaciones en el curso del mecanizado.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

La consecución del mecanizado desatendido, como paso obligado para llegar a la automatización completa de los procesos de manufacturación, y la aplicación en ellos del Control Adaptativo se encuentran frenadas por la falta de sensores fiables y precisos, que den cuenta sin dificultar el proceso de los muchos aspectos en él involucrados. A continuación enunciamos las contribuciones de la presente memoria a la solución del problema:

- Se ha presentado la importancia de la duración del útil de corte en los procesos de mecanizado y se han estudiado los diferentes aspectos de los fenómenos que determinan dicha duración. Posteriormente, se han analizado los modelos que han sido desarrollados para predecirla. Del estudio de sus condiciones de validez y aplicación práctica se ha concluido la necesidad de supervisar durante el proceso el estado de la herramienta, junto con el resto de las circunstancias de éste, como único camino para llegar al mecanizado desatendido.
- Se defiende que un sistema unisensorial no puede suministrar un conjunto completo de soluciones para llevar a cabo un mecanizado desatendido y se demuestra que para conseguirlo es preciso un sistema de tiempo real multisensorial cooperativo.

- Se ha concebido y realizado un sistema de este tipo que evalúa la potencia eléctrica consumida por el motor de avance, el par generado por dicho motor, la fuerza de avance y la temperatura media de la unión pieza-herramienta.
- Se ha desarrollado una metodología de características ventajosas para estimar en tiempo real el estado de la herramienta durante los procesos de mecanizado.
- Se ha mostrado como cada variable suministra información parcial del comportamiento del proceso. Se ha podido constatar que la medida del sensor de temperatura es afectada por diversos factores por lo que, en algunas ocasiones, debe ser contrastada con las medidas de otros sensores. El sensor de esfuerzos suministra datos muy valiosos, aunque su uso perturba el proceso y presenta dificultades de implantación. Aunque la información sobre las condiciones del proceso facilitada por los sensores de potencia y par es redundante, ambas son necesarias para la aplicación del Control Adaptativo y la conducción del proceso dentro de situaciones no límite.
- Con el método propuesto se ha podido predecir con suficiente antelación la rotura de la herramienta de corte

y estimar su grado de deterioro.

- Se han encontrado datos que permiten correlacionar la potencia empleada en el mecanizado con el desgaste de la herramienta. Lo que muestra la posibilidad de realizar durante el proceso de mecanizado una compensación automática, y quizá discreta, del desgaste de la herramienta.

A partir de este momento nuestros trabajos tienen dos objetivos, que si bien están lejanos para todos los autores debido a la complejidad e incertidumbre de los procesos de mecanizado, pretendemos alcanzar: Evaluar con precisión el desgaste de la herramienta a partir de los datos suministrados por el sistema e implantar éste en una máquina-herramienta para realizar un mecanizado sin intervención humana.

Para ello se complementará el sistema con un sensor de emisión acústica, se elaborarán modelos multivariados en base al tratamiento estadístico de los datos obtenidos y se modelará la correlación entre el desgaste de la herramienta y la potencia o el par de motor de avance.

APENDICE 1

TERMINOLOGIA USADA EN LA MEMORIA

TERMINOLOGIA USADA EN LA MEMORIA

A continuación se definen y describen los conceptos fundamentales del dominio que es objeto del presente trabajo de investigación y que son usados a lo largo de él. En las normas UNE 16-149 /134/ y UNE 15001 /135/ y en los libros de Oberg et al. /8/ y Boothroyd /5/ puede encontrarse una nomenclatura más completa. Las ilustraciones de este apéndice provienen de la última fuente.

En la figura A.1 se representan las partes más importantes de la máquina-herramienta utilizada y en la A.2 se señalan los términos relativos a la operación de mecanizado que ha sido llevada a cabo en los ensayos.

- Movimiento de corte. Es el movimiento que, según el tipo de máquina-herramienta, posee la pieza o la herramienta y que absorbe generalmente la mayor parte de la potencia consumida por la máquina.

- Movimiento de avance. Es el movimiento que permite el desplazamiento del punto de aplicación de la herramienta sobre la superficie de trabajo de la pieza.

- Fuerza de corte. Es la que actúa en dirección y sentido del movimiento de corte.

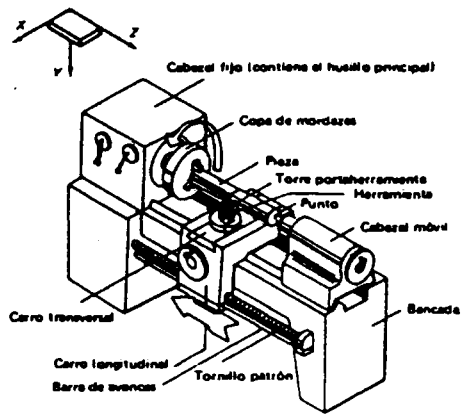


Fig. A.1 Torno

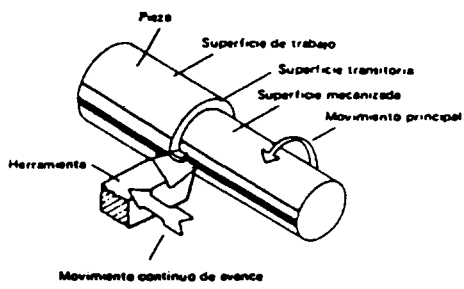


Fig. A.2 Operación de cilindrado

- Fuerza de avance. Es la que actúa en la dirección y sentido del movimiento de avance.

En el texto se usan a veces los términos de fuerza de corte y esfuerzo de corte con el sentido general de la fuerza resultante de todas las que intervienen en el corte.

Se definen seguidamente los aspectos geométricos más importantes de la parte activa de las herramientas de corte. En la figura A.3 se indican algunos de ellos.

- Cara de desprendimiento. Una o más superficies sobre las que desliza la viruta.
- Cara de incidencia principal (también llamada flanco). Una o más superficies enfrentadas a la superficie en curso de mecanización.
- Cara de incidencia secundaria. Una o más superficies enfrentadas a la superficie mecanizada.
- Arista o filo de corte principal. Borde de la cara de desprendimiento destinada al arranque de material y que ataca a la superficie en curso de mecanización.
- Arista o filo de corte secundario. Borde de la cara de desprendimiento que no constituye el filo principal.

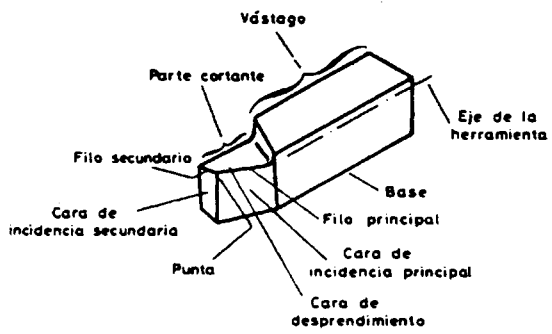


Fig.A.3 Herramienta típica de corte único

- Punta de la herramienta. Parte del filo que enlaza las aristas de corte principal y secundaria. Puede ser redondeada, achaflanada o reducirse a un punto.
- Angulo de desprendimiento. Es el formado entre la cara de desprendimiento y la horizontal.
- Angulo de incidencia. Es el formado con un plano vertical por la cara de incidencia.
- Angulo de posición. Es el ángulo formado por el filo de corte principal y un plano paralelo al eje del mango de la herramienta.
- Angulo de ataque. Es el ángulo entre el filo de corte principal y un plano perpendicular a la dirección de avance. Puede coincidir con el ángulo de posición.

APENDICE 2

PROGRAMAS DE APLICACION

*** LEA ***

```

10 |
20 |
30 |
40 | *****
50 | *
60 | * REGISTRO DE MAGNITUDES FISICAS *
70 | * QUE INTERVIENEN EN EL MECANIZADO *
80 | * USANDO EL VOLTIMETRO Y EL *
90 | * MULTIPLEXOR *
100 | *****
110 |
120 | CONSIDERACIONES: 1) Rango de medida del voltmetro 18V.
130 |
140 |
150 |
160 | *****
170 | * Inicializacion del Reloj *
180 | *****
190 |
200 | OUTPUT 2:CHR$(255)&CHR$(75);
210 | Fmt: IMAGE #,3A," ",2A," ",2A," ",2A,K
220 | Left=CHR$(255)&CHR$(72) ! Mueve el cursor al principio de la linea
230 | OUTPUT KBD USING Fmt:"APR","30","10","00",Left
240 | LINPUT "Entra la fecha y hora con este formato",F8
250 | SET TIMEDATE DATE(F8(5:2)&" " &F8(1:3)&" 1986")+TIME(F8(9:5))
260 |
270 |
280 | *****
290 | * Inicializacion de Variables y Condiciones *
300 | *****
310 |
320 | OPTION BASE 1
330 | DIM Mat$(7),Mer$(7),Ave$,Avf$,Ave$,Vel$,Pro$,Lon$,Dia$,Frm$,Var$(9),N,exp$(8),I
INTEGER N3_med
340 | INTEGER Mes,N3_med,prev,Point,Oldpoint,N3_med,screen,Can,Espera,J,Colum
na,Fila,Reg_cab,Grflag
350 | DATA Jan,Feb,Mar,Apr,May,Jun,Jul,Aug,Sep,Oct,Nov,Dec
360 | Clear=CHR$(255)&CHR$(75)
370 | Grflag=1
380 | OFF CYCLE ' \
390 | OFF KBD ' \ PREVENCIÓN DE BLOQUEO DEL
400 | OFF DELAY ' / ESPACIO "ALLOCATED"
410 | OFF ERROR ' /
420 |
430 |

```

```

440 ' .....
450 ' * Inicializacion de la Pantalla Grafica para Tiempo Real *
460 ' .....
470 '
480 PRINT TABXY(10,9);"Se esta inicializando en modo silente el grafico de
tiempo real"
490 Xmax=4 ' REPRESENTACION DE LAS OBSERVACIONES DE 4 MINUTOS
500 Ymax=10000
510 INTEGER Screen(7500)
520 '
530 GINIT
540 PLOTTER IS 3,"INTERNAL"
550 X_gdu_max=100*MAX(1,RAT10)
560 Y_gdu_max=100*MAX(1,1/RAT10)
570 '
580 LORG 6
590 FOR I=-.2 TO .2 STEP .1
600 MOVE X_gdu_max/2+I,Y_gdu_max
610 LABEL "SEGUIMIENTO DEL MECANIZADO"
620 NEXT I
630 '
640 DEG
650 LDIR 90
660 CSIZE 3.5
670 MOVE 0,Y_gdu_max/2
680 LABEL "Variables Observadas"
690 '
700 LORG 4
710 LDIR 0
720 MOVE X_gdu_max/2,0
730 LABEL "Tiempo (min.)"
740 '
750 VIEWPORT .06*X_gdu_max,.99*X_gdu_max,.07*Y_gdu_max,.95*Y_gdu_max
760 WINDOW 0,Xmax,-Ymax,Ymax
770 AXES 1/6,500,0,-Ymax,3,4,4
780 AXES 1/6,Ymax,0,0,3,Ymax,2
790 AXES 1/6,500,Xmax,Ymax,3,4,4
800 '
810 CLIP OFF
820 CSIZE 3.3..5
830 LORG 6
840 FOR I=0 TO Xmax STEP .5
850 MOVE I,-(Ymax+150)
860 LABEL USING "0,0.0":I
870 NEXT I
880 :ORIG 0
890 FOR I=-Ymax TO Ymax STEP 2000
900 MOVE -Xmax/200,I
910 LABEL USING "0,000":1/1000
920 NEXT I
930 PENUP
940 GSTORE Screen(0)

```

```

950  GCLEAR
960  OUTPUT 2;Clear#;
970  '
980  '
990  '          +-----+
1000 '          + Condiciones Defectivas del Ensayo +
1010 '          +-----+
1020 '
1030 Mat#="F114"
1040 Her#="AR3"
1050 Lon=500
1060 Dia=50
1070 Vel=75
1080 Av#=.1
1090 Avf=.1
1100 Avs=0
1110 Pr#=#
1120 Fr#=#
1130 Var#="TPIF"
1140 GOSUB Condi
1150 '
1160 '
1170 '          +-----+
1180 '          + Preparacion Inicial de la Instrumentacion +
1190 '          +-----+
1200 '
1210 ABORT 7
1220 ASSIGN %Volt TO 722
1230 ASSIGN %Fuen TO 707
1240 REMOTE %Volt
1250 REMOTE %Fuen
1260 OUTPUT %Volt;"H T3"
1270 '
1280 OUTPUT 2;Clear#;
1290 PRINT TABXY(1,5);"* Seleccione: Rosca Metrica y Posicion 1 en la Caja M
orton"
1300 PRINT TABXY(1,7);"* Coloque la Correa del Motor Principal en 504"
1310 PRINT TABXY(1,9);"* Conecte la Unidad de Control del Torno y Seleccione
REMOTE"
1320 PRINT TABXY(1,11);"* Pon los Conmutadores TERMINALS y GUARD (Rear) del
Voltmetro en REAR y OPEN"
1330 PRINT TABXY(1,13);"* Pulse HOME e INITIATE en el Multiplexor"
1340 PRINT TABXY(1,15);"* Inserta en el Drive 1 el Disco de Datos Correspond
iente"
1350 PRINT TABXY(1,19);"* Pulse CONT para continuar"
1360 PAUSE
1370 '
1380 OUTPUT %Volt;"T3" ' Posicionamiento en el canal 1
1390 OUTPUT 2;Clear#;
1400 WAIT .5
1410 '
1420 '

```

```

1438 *
1440 *      + Creacion del N3 de Experiencia +
1450 *      +-----+
1460 *
1470 Fecha$=DATE$(TIMEDATE)
1480 Mes=1
1490 READ Mes$
1500 IF Mes$(>)Fecha$(4;3) THEN
1510     Mes=Mes+1
1520     GOTO 1490
1530 END IF
1540 *
1550 Horas=TIME$(TIMEDATE)
1560 IF Mes(1) THEN
1570     N_Exp$=VAL$(Mes)&Fecha$(1;2)&Horas$(1;2)&Horas$(4;2)
1580 ELSE
1590     N_Exp$=Mes$(1;1)&Fecha$(1;2)&Horas$(1;2)&Horas$(4;2)
1600 END IF
1610 PRINT TABXY(25,3);"Experiencia n3: "N_Exp$
1620 PRINT TABXY(25,4);"-----"
1630 *
1640 *
1650 *      +-----+
1660 *      + Reprogramacion para Grafico en Tiempo Real +
1670 *      +-----+
1680 *
1690 N3_med_screen=INT(Xmax*60/Fm)
1700 * En el peor caso, el anterior redondeo solo introduciria en el grafico
1710 * de tiempo real un error despreciable y absolutamente inobservable
1710 VIEWPORT .06*X_gdu_max,.99*X_gdu_max,.07*Y_gdu_max,.95*Y_gdu_max
1720 WINDOW 0,N3_med_screen,-10000,10000
1730 PEN 1
1740 *
1750 *
1760 *      +-----+
1770 *      + Programacion del 3456A, del 4140B +
1780 *      + y Arranque de los Motores +
1790 *      +-----+
1800 *
1810 OUTPUT 2Volt;"F1 R4 Z1 00 SW0 0STD 45T6 .01ST1 ";Can:"57N 501"
1820 * SE PUEDE GANAR VELOCIDAD DE MEDIDA PONIENDO AUTOCERO OFF (Z0)
1830 *
1840 OUTPUT 2Fuen;"F1 L3 M3"
1850 OUTPUT 2Fuen;"B1,PB"VAL$(Rv)
1860 IF Avf=Avr THEN
1870     OUTPUT 2Fuen;"A2,PS0,PT"VAL$(Rfi)&"PE.1,PH2,PJ.22"
1880     OUTPUT 2Fuen;"W1"
1890     PRINT TABXY(1,9);"Estoy arrancando motores"
1900     WAIT 3+Rfi/.22
1910     OUTPUT 2Fuen;"W3"
1920 ELSE
1930     OUTPUT 2Fuen;"A4,PS0,PT"VAL$(Rff)

```



```

1940     OUTPUT 2Fuen;"PE.01.PH0"
1950     OUTPUT 2Fuen;"W2"
1960     PRINT TABXY(1,9);"Estoy arrancando motores"
1970     FOR I=1 TO Rf/.01
1980         OUTPUT 2Fuen;"W6"
1990         WAIT .04
2000     NEXT I
2010     OUTPUT 2Fuen;"PE*HVAL0(Rfs)& ",PH1999,P0*HVAL0(Step_delay)
2020 END IF
2030 BEEP
2040 PRINT TABXY(1,9);"Los motores han alcanzado su velocidad de trabajo"
2050 '
2060 '
2070 '          ++++++
2080 '          + Medicion +
2090 '          ++++++
2100 '
2110 ALLOCATE Adqui(Can),INTEGER Med(N3_med_prev,Can)
2120 PRINT TABXY(1,15);"Para iniciar la adquisicion de datos pulsa CONT"
2130 PRINT TABXY(1,16);"Para abortar el proceso pulsa el ESPACIADOR"
2140 N3_med=0
2150 PAUSE
2160 '
2170 OUTPUT 2;Clear4;
2180 GRAPHICS ON
2190 ON CYCLE 1/Frm GOSUB Mide
2200 ON KBD GOTO Frena
2210 IF Avf()Avi THEN ON DELAY Espera GOSUB Sube
2220 '
2230 Lazo:IF N3_med=N3_med_prev THEN Frena
2240     IF N3_med MOD (N3_med_screen)=0 THEN GLOAD Screen(*)
2250     GOTO Lazo
2260 '
2270 '          ++++++
2280 '          + Deceleracion de Motores +
2290 '          ++++++
2300 '
2310 Frena:OFF CYCLE
2320 OFF KBD
2330 IF Avf()Avi THEN OFF DELAY
2340 GRAPHICS OFF
2350 IF N3_med=N3_med_prev THEN
2360     PRINT TABXY(10,9);"Finalizada la tarea de medida"
2370     FOR I=1 TO 10
2380         BEEP 100*1..2
2390     NEXT I
2400 ELSE
2410     PRINT TABXY(10,9);"B Ya va ....., ya va .... "
2420     WAIT .5
2430 END IF
2440 '
2450 IF Avf()Avi THEN

```

```

2460     OUTPUT @Fuen;"W3"
2470     OUTPUT @Fuen;"PE.01,PD.04"
2480     END IF
2490     OUTPUT @Fuen;"PH3" ' PARADA DEL MOTOR PPAL. 3 SEG. DESPUES DEL DE AVAN
CE
2500     OUTPUT @Fuen;"W4"
2510     '
2520     PRINT TABXY(10,9);"Motor de avance parado en";
2530     IF Avf=Avi THEN
2540         PRINT PROUND(Rff/.22,-1);
2550     ELSE
2560         PRINT PROUND(Rff/(.01/.04),-1);
2570     END IF
2580     PRINT " segundos"
2590     PRINT TABXY(10,10);"3 seg. despues paro el motor principal"
2600     WAIT 1.5
2610     OUTPUT 2;Clear$;
2620     '
2630     !
2640     '          ++++++
2650     '          + Registro de las Medidas en Disco +
2660     '          + y Calculo de Valores Medios +
2670     '          ++++++
2680     '
2690     ALLOCATE Med_Lmedia(Can)
2700     REDIM Med(N3_med,Can)! QUITA DEL ARRAY LAS FILAS NO USADAS
2710     '
2720     ' NO PUEDE UTILIZARSE: MAT Med_Lmedia=CSUM(Med) EN LUGAR DE LAS SIGUIENT
ES 5 LINEAS PORQUE PUEDE PRODUCIR UN "INTEGER OVERFLOW"
2730     FOR Columna=1 TO Can
2740         FOR Fila=1 TO N3_med
2750             Med_Lmedia(Columna)=Med_Lmedia(Columna)+Med(Fila,Columna)
2760         NEXT Fila
2770     NEXT Columna
2780     MAT Med_Lmedia= Med_Lmedia/(N3_med)
2790     PRINT TABXY(1,1);"VALORES MEDIDOS DE LAS VARIABLES MEDIDAS;"
2800     PRINT TABXY(1,3);Med_Lmedia(*)
2810     '
2820     Reg_cab=INT((15+LEN(Mat$)+LEN(Her$)+LEN(Var$)+64+2*8*Can)/2)
2830     ON ERROR GOSUB Aviso
2840     CREATE BDAT N_Exp$@":,700,1",Reg_cab+N3_med*Can,2
2850     OFF ERROR
2860     ASSIGN @Disco TO N_Exp$@":,700,1"
2870     OUTPUT @Disco;Mat$,Her$,Avi,Avf,Avs,Vel,Pro,Lon,Dia,Frm,Var$,N3_med,Med
_Lmedia(*)
2880     IF VAL(SYSTEM$("AVAILABLE MEMORY"))-250(2*Can*N3_med) THEN
2890         DELSUB Graf$total' SI NO HAY ESPACIO PARA REORDENAR BORRA LA SUBRUT
INA GRAFICA
2900         Graf$lag=0
2910     END IF
2920     IF VAL(SYSTEM$("AVAILABLE MEMORY"))-250(2*Can*N3_med) THEN
2930         ALLOCATE INTEGER Med_L((Can,N3_med)

```

```

2940     MAT Med_t= TRN(Med) ' REORDENAMIENTO DE LAS MEDIDAS POR VARIABLES
2950     OUTPUT 20:Disco;Med_t(*)
2960     DEALLOCATE Med_t(*)
2970     ELSE
2980         BEEP
2990         INPUT "Por falta de memoria no he podido reordenar las medidas. 9E
nterado? (S)",Cont$
3000         IF Cont$(*)="S" THEN 2990
3010         OUTPUT 20:Disco;Med(*)
3020     END IF
3030     ASSIGN 20:Disco TO #
3040     OUTPUT 2;Clear$:
3050     '
3060     '
3070     '          ++++++
3080     '          + Presentacion Grafica de Resultados +
3090     '          ++++++
3100     '
3110     IF GrafFlag=0 THEN
3120         LOADSUB GrafTotal FROM "LEA"
3130         GrafFlag=1
3140     END IF
3150     GINIT ' Debe colocarse fuera del subprograma porque su ejecucion borra
la definicion de PLOTTER IS
3160     PEN -1
3170     CALL GrafTotal(Med_Media(*),Med(*))
3180     INPUT "¿ Deseas una copia en papel ? (S/N)",Cont$
3190     IF Cont$="S" THEN
3200         INPUT "¿ Has conectado el PLOTTER, puesto la hoja .....? (S/N)
",Cont$
3210         IF Cont$(*)="S" THEN 3200
3220         GINIT! Debe colocarse fuera del subprograma porque su ejecucion bo
rra la definicion de PLOTTER IS
3230         PLOTTER IS 705,"HPGL"
3240         CALL GrafTotal(Med_Media(*),Med(*))
3250         PLOTTER IS 3,"INTERNAL"
3260     END IF
3270     GCLEAR
3280     '
3290     '
3300     '          ++++++
3310     '          + Siguiente Experiencia +
3320     '          ++++++
3330     '
3340     DEALLOCATE Med_Media(*),Med(*),Adqui(*)
3350     INPUT "¿ DESEAS REALIZAR UNA NUEVA EXPERIENCIA ? (S/N)",Cont$
3360     IF Cont$="S" THEN
3370         GOSUB Cond:
3380         OUTPUT 2;Clear$:
3390         GOTO 1550
3400     ELSE
3410         GOTO Fin

```

```

3420 END IF
3430 ' =====
4000 '
4010 '
4020 ' *****
4030 ' * CONDI: *
4040 ' *****
4050 '
4060 Conds: ' CONDICIONES DEL ENSAYO
4070 ON KEY 0 LABEL "SELECCION" GOTO Selection
4080 ON KEY 4 LABEL "FIN" GOTO Calc_test
4090 '
4100 Menu:OUTPUT 2;Clear;
4110 PRINT TABXY(23,1);"CONDICIONES DEL ENSAYO"
4120 PRINT TABXY(1,4);" Material: ";Mat$
4130 PRINT " Herramienta: ";Her$
4140 PRINT " Longitud: ";Lon;"mm"
4150 PRINT " Diametro: ";Dia;"mm"
4160 PRINT " Velocidad: ";Vel;"m/min"
4170 PRINT " Avance inicial: ";Avi;"mm/vuelta"
4180 PRINT " Avance final: ";Avf;"mm/vuelta"
4190 PRINT " Salto de Avance: ";Avs;"mm/vuelta"
4200 PRINT " Profundidad: ";Pro;"mm"
4210 PRINT " Frec. de Muestreo: ";Fm;"Hz"
4220 PRINT " Variables Medidas: ";Var$
4230 PRINT TABXY(1,18);"Usa la rueda si deseas cambiar alguna condicion y ou
!sa SELECCION"
4240 '
4250 Point=1
4260 PRINT TABXY(1,Point+3);" "
4270 ON KNOB .1 GOTO Knob_srv
4280 Loop2:GOTO Loop2
4290 '
4300 Knob_srv:K=KNOBK+KNOBY
4310 Oldpoint=Point
4320 IF K<0 THEN
4330 Point=Point-1
4340 ELSE
4350 Point=Point+1
4360 END IF
4370 IF Point<1 THEN Point=1
4380 IF Point>11 THEN Point=1
4390 PRINT TABXY(1,Oldpoint+3);" "
4400 PRINT TABXY(1,Point+3);" "
4410 GOTO Loop2
4420 '
4430 Selection: '
4440 OFF KNOB
4450 PRINT TABXY(1,18);"( Da RETURN si ya no quieres hacer el cambio )"
4460 SELECT Point
4470 CASE 1

```

```

4480 INPUT "Material?",Mat$
4490 CASE 2
4500 INPUT "Marrasenta?",Her$
4510 CASE 3
4520 INPUT "Longitud (mm)?",Lon
4530 CASE 4
4540 INPUT "Dianetro (mm)?",Dia
4550 CASE 5
4560 INPUT "Velocidad (m/min)?",Vel
4570 CASE 6
4580 INPUT "Avance inicial (mm/ruelta)?",Avi
4590 CASE 7
4600 INPUT "Avance final (mm/ruelta)?",Avf
4610 CASE 8
4620 INPUT "Salto de Avance (mm/ruelta)?",Avs
4630 CASE 9
4640 INPUT "Profundidad (mm)?",Pro
4650 CASE 10
4660 INPUT "Frec. de Muestreo (Hz)?",Frm
4670 CASE 11
4680 INPUT "Variables Medidas?",Var$
4690 END SELECT
4700 GOTO Menu
4710 '
4720 Calc_test: '
4730 IF Lon(<=0 OR Lon)>600 THEN
4740 Point=3
4750 GOTO Fail
4760 END IF
4770 '
4780 IF Dia(<10 OR Dia)>80 THEN
4790 Point=4
4800 GOTO Fail
4810 END IF
4820 '
4830 Wp=(1000*Vel)/(PI*Dia)
4840 Wv=Wp*(1420.0/584.0)
4850 Rv=.003059*Wv*.008
4860 IF Wv(<=0 OR Rv)>9.53 THEN
4870 Point=5
4880 GOTO Fail
4890 END IF
4900 Rv=PROUND(Rv,-2)
4910 '
4920 Wf=Avi*Wp*9.378
4930 Rfi=.004509*Wf*.001
4940 IF Wf(<=0 OR Rfi)>9.55 THEN
4950 Point=6
4960 GOTO Fail
4970 END IF
4980 Rfi=PROUND(Rfi,-2) ' AJUSTE A RESOLUCION FUENTE PROGRAMABLE
4990 '

```

```

5000 Wff=Avf*Mp*9.378
5010 Rff=.004509*Wff+.001
5020 IF Wff(Wfi OR Rff)>9.55 THEN
5030     Point=7
5040     GOTO Fail
5050 END IF
5060 Rff=PROUND(Rff,-2) ! AJUSTE A RESOLUCION FUENTE PROGRAMABLE
5070 '
5080 IF Avf=Avi THEN
5090     IF Avs()=0 THEN
5100         Point=8
5110         GOTO Fail
5120     END IF
5130 ELSE
5140     Wfs=Avs*Mp*9.378
5150     Rfs=.004509*Wfs+.001
5160     IF Rfs(<.01 OR Rfs)>Rff-Rfi THEN
5170         Point=8
5180         GOTO Fail
5190     END IF
5200     Rfs=PROUND(Rfs,-2) ! AJUSTE A RESOL. FUENTE PRGR.
5210 END IF
5220 '
5230 IF Pro(0 OR Pro)>4 THEN
5240     Point=9
5250     GOTO Fail
5260 END IF
5270 '
5280 IF Frm(<.015 OR Frm)>60 THEN
5290     Point=10
5300     GOTO Fail
5310 END IF
5320 '
5330 GOTO 5390
5340 Fail: BEEP
5350 PRINT TABXY(40,3+Point); "----"
5360 PRINT TABXY(1,18); "La variable que se7alo esta fuera de rango, por favor dame un nuevo valor"
5370 GOTO 4460
5380 '
5390 IF Avf=Avi THEN
5400     Duracion=Lon/(Avi*Mp)
5410 ELSE
5420     Saltos=(Rff-Rfi)/Rfs
5430     IF FRACT(Saltos)<0 THEN Saltos=INT(Saltos)+1
5440     Duracion=Lon/Mp*(Avi+(.5-.4/Saltos)*Avf-Avi):
5450     Step_delay=(.8*Duracion)/Saltos
5460     Step_delay=60*Step_delay ' Conversion a segundos
5470     Step_delay=INT(Step_delay*10)/10 ' Ajuste por defecto a 'a maxim
a resolucio (comun a todos los rangos) de la fuente progr.
5480     IF Step_delay(<.1 OR Step_delay)>:00 THEN
5490         BEEP

```

```

5500      OUTPUT 2;Clear$;
5510      PRINT TABXY(5,10);"LA DURACION DESEADA DEL ESCALON: ";Step_de
:ay;" seg. ESTA FUERA DE RANGO"
5520      IF Step_delay<.1 THEN Step_delay=.1
5530      IF Step_delay>100 THEN Step_delay=100
5540      PRINT TABXY(5,13);"TONARE EN SU LUGAR: ";Step_delay;" seg., S
I NO TE IMPORTA"
5550      WAIT 3
5560      Espera=INT(Duracion/10)
5570      END IF
5580      END IF
5590      N3_med_prev=INT(1.1*Frm*60*Duracion)
5600      Can=LEN(Var$)
5610      OFF KEY
5620      OFF K408
5630      OUTPUT 2;Clear$;
5640      RETURN
6000      '
6010      '
6020      '          ++++++++
6030      '          + MIDE: +
6040      '          ++++++++
6050      '
6060      Mide:OUTPUT 2;Volt;"T3"
6070      ENTER 2;Volt;Adqui(=)
6080      N3_med=N3_med+1
6090      *AT Adqui=Adqui*(1000)
6100      FOR J=1 TO Can
6110          Med(N3_med,J)=Adqui(J)
6120          PLOT N3_med MOD (N3_med*screen),Adqui(J),1
6130          PENUP
6140      NEXT J
6150      RETURN
7000      '
7010      '
7020      '          ++++++++
7030      '          + SUBE: +
7040      '          ++++++++
7050      '
7060      '          Comienzo de la subida en escalera del avance
7070      Sube:OUTPUT 2;V4"
7080      RETURN
8000      '
8010      '
8020      '          ++++++++
8030      '          + AVISO: +
8040      '          ++++++++
8050      '
8060      '          Aviso de disco lleno y posibilidad de cambiarlo
8070      BEEP
8080      IF ERR=64 THEN
8090          PRINT TABXY(7,15);"DISCO DE DATOS COMPLETO. Introduce uno nuev

```

```

o y ou'sa CONT(((*
8100 ELSE
8110 PRINT TABXY(7,15);*)) ERROR IMPREVISTO N3: ";ERRN
8120 END IF
8130 PAUSE
8140 PRINT TABXY(7,15);*
.
8150 RETURN
8160 '
8170 Fin:END
8180 '
9000 '
9010 '
9020 '
9030 ' *****
9040 ' + SUBPROGRAMA GRAFTOTAL +
9050 ' *****
9060 '
9060 SUB Graftotal(Med_media(*), INTEGER Med(*))
9070 OPTION BASE 1
9080 DIM Mat$(Her$,Avi,Auf,Avs,Vel,Pro,Lon,Dia,Frm,Var$,Nexp$(8)),INTEG
ER N3_med
9090 INTEGER Xmax,Can,Pluma,Columna,File
9100 '
9110 Can=LEN(Var$)
9120 T_med=(N3_med-1)/(Frm*60) ' Duracion de la medida en minutos. La
primera se hace en t=0
9130 IF T_med-INT(T_med)=0 THEN
9140 Xmax=T_med
9150 ELSE
9160 Xmax=1+INT(T_med)
9170 END IF
9180 Ymax=10000
9190 '
9200 PRINT TABXY(1,15);"Para continuar o abortar la representacion pul
sar e! espaciador"
9210 WAIT 1
9220 OUTPUT 2;CHR$(255)&"K";
9230 ON KBD GOTO Exit
9240 '
9250 GRAPHICS ON
9260 '
9270 X_gdu_max=100#MAX(1,RATIO)
9280 Y_gdu_max=100#MAX(1,1/RATIO)
9290 LORG 6
9300 PEN 1
9310 IF SYSTEM("PLOTTER IS")="705" THEN
9320 MOVE X_gdu_max/2,Y_gdu_max
9330 LABEL "PROCESO DE MECANIZADO"
9340 ELSE
9350 FOR I=-.25 TO .25 STEP .2
9360 MOVE X_gdu_max/2+I,Y_gdu_max
9370 LABEL "PROCESO DE MECANIZADO"

```



```

9380         NEXT I
9390     END IF
9400     '
9410     DEG
9420     LDIR 90
9430     CSIZE 3.5
9440     PEN 2
9450     MOVE 0,Y_gdu_max/2
9460     LABEL "Variables observadas: "&Var$
9470     LORG 4
9480     LDIR 0
9490     MOVE X_gdu_max/2, .89*Y_gdu_max
9500     LABEL "Tiempo (min.)"
9510     LORG 1
9520     MOVE 0,4
9530     LABEL M_exp$;N3_med;
9540     FOR I=1 TO Can-1
9550     LABEL USING "0,00.00";Med_media(I)/1000
9560     NEXT I
9570     LABEL USING "00.00";Med_media(Can)/1000
9580     MOVE 0,0
9590     LABEL Mats;" ";Her$;Avi;Avf;Avs;Vel;Pro;Lon;Dia;Fro;" ";Vars
9600     VIEWPORT .88*X_gdu_max, .98*X_gdu_max, .17*Y_gdu_max, .92*Y_gdu_max
9610     WINDOW 0,Xmax,-Ymax,Ymax
9620     AXES Xmax/100,Ymax/20,0,-Ymax,10,4,3
9630     AXES Xmax/100,Ymax,0,0,10,Ymax,1.5
9640     AXES Xmax/100,Ymax/20,Xmax,Ymax,10,4,3
9650     '
9660     CLIP OFF
9670     CSIZE 3.3,.5
9680     LORG 4
9690     FOR I=0 TO 10
9700         MOVE I*Xmax/10,-(Ymax+Ymax/200)
9710         LABEL USING "0,00.00";I*Xmax/10
9720     NEXT I
9730     LORG 8
9740     FOR I=-10 TO 10 STEP 2
9750         MOVE -Xmax/200,I*Ymax/10
9760         LABEL USING "0,000";I*Ymax/10000
9770     NEXT I
9780     PENUP
9790     '
9800     Pluma=3
9810     PEN Pluma
9820     FOR Columna=1 TO Can
9830         FOR Fila=1 TO N3_med
9840             PLOT (Fila-1)*Fro+60,Med(Fila,Columna) Sup.med.da I
9850             NEXT Fila
9860             PENUP
9870             Pluma=Pluma+1
9880             IF Pluma>6 THEN Pluma=3

```

```
9899      PEN Pluma
9900      NEXT Columna
9910      GOTO 9910
9920 Exit: OFF KBD
9930      PEN 0
9940      GRAPHICS OFF
9950      GCLEAR
9960      OUTPUT 2;Clear$;
9970      SUBEND
```

*** LEA_GRAF ***

```

10
20
30
40
50 * GRAFICO Y LISTADO DE LAS *
60 * MEDIDAS TOMADAS POR *
70 * EL PROGRAMA: LEA *
80 *
90 *****
100
110
120
130
140 COM Clear$(2)
150 INTEGER Cpc
160 Clear$=CHR$(255)&CHR$(75)
170
180 OUTPUT 2;Clear$:
190 PRINT TABXY(32,3);"MENU DE TRABAJO"
200 PRINT TABXY(32,4);"=====*"
210 PRINT TABXY(10,11);"LISTADO DE LOS DATOS DE UNA EXPERIENCIA"
220 PRINT TABXY(12,12);"2. GRAFICO EN PANTALLA DE UNA EXPERIENCIA"
230 PRINT TABXY(14,13);"3. GRAFICO EN PLOTTER DE UNA EXPERIENCIA"
240 PRINT TABXY(16,14);"4. FIN DE TAREAS"
250 PRINT TABXY(18,15);"INDICA LA OPCION QUE ELIJES"
260 INPUT Cpc
270 IF Cpc<>4 THEN INPUT "QUE EXPERIENCIA?",NExp$
280 SELECT Cpc
290 CASE 1
300 CALL Listd.sc(NExp$)
310 CASE 2
320 GUNIT : Debe colocarse fuera del subprograma porque su ejecucion borra la definicion de
PLOTTER IS
330 PLOTTER IS 3,"INTERNAL"
340 CALL Grafic.sc(NExp$)
350 CASE 3
360 GUNIT : Debe colocarse fuera del subprograma porque su ejecucion borra la definicion de
PLOTTER IS
370 PLOTTER IS "PS","HPGL"
380 CALL Grafic.sc(NExp$)
390 CASE 4
400 PLOTTER IS 3,"INTERNAL"
410 GOTO Fin
420 END SELECT
430 GOTO Fin
440 Fin: END

```

```

:200
:201
:202
:203
:204
:205
:206
:207
:208
:209
:210
:211
:212
:213
:214
:215
:216
:217
:218
:219
:220
:221
:222
:223
:224
:225
:226
:227
:228
:229
:230
:231
:232
:233
:234
:235
:236
:237
:238
:239
:240
:241
:242
:243
:244
:245
:246
:247
:248
:249
:250
:251
:252
:253
:254
:255
:256
:257
:258
:259
:260
:261
:262
:263
:264
:265
:266
:267
:268
:269
:270
:271
:272
:273
:274
:275
:276
:277
:278
:279
:280
:281
:282
:283
:284
:285
:286
:287
:288
:289
:290
:291
:292
:293
:294
:295
:296
:297
:298
:299
:300
:301
:302
:303
:304
:305
:306
:307
:308
:309
:310
:311
:312
:313
:314
:315
:316
:317
:318
:319
:320
:321
:322
:323
:324
:325
:326
:327
:328
:329
:330
:331
:332
:333
:334
:335
:336
:337
:338
:339
:340
:341
:342
:343
:344
:345
:346
:347
:348
:349
:350
:351
:352
:353
:354
:355
:356
:357
:358
:359
:360
:361
:362
:363
:364
:365
:366
:367
:368
:369
:370
:371
:372
:373
:374
:375
:376
:377
:378
:379
:380
:381
:382
:383
:384
:385
:386
:387
:388
:389
:390
:391
:392
:393
:394
:395
:396
:397
:398
:399
:400
:401
:402
:403
:404
:405
:406
:407
:408
:409
:410
:411
:412
:413
:414
:415
:416
:417
:418
:419
:420
:421
:422
:423
:424
:425
:426
:427
:428
:429
:430
:431
:432
:433
:434
:435
:436
:437
:438
:439
:440
:441
:442
:443
:444
:445
:446
:447
:448
:449
:450
:451
:452
:453
:454
:455
:456
:457
:458
:459
:460
:461
:462
:463
:464
:465
:466
:467
:468
:469
:470
:471
:472
:473
:474
:475
:476
:477
:478
:479
:480
:481
:482
:483
:484
:485
:486
:487
:488
:489
:490
:491
:492
:493
:494
:495
:496
:497
:498
:499
:500
:501
:502
:503
:504
:505
:506
:507
:508
:509
:510
:511
:512
:513
:514
:515
:516
:517
:518
:519
:520
:521
:522
:523
:524
:525
:526
:527
:528
:529
:530
:531
:532
:533
:534
:535
:536
:537
:538
:539
:540
:541
:542
:543
:544
:545
:546
:547
:548
:549
:550
:551
:552
:553
:554
:555
:556
:557
:558
:559
:560
:561
:562
:563
:564
:565
:566
:567
:568
:569
:570
:571
:572
:573
:574
:575
:576
:577
:578
:579
:580
:581
:582
:583
:584
:585
:586
:587
:588
:589
:590
:591
:592
:593
:594
:595
:596
:597
:598
:599
:600
:601
:602
:603
:604
:605
:606
:607
:608
:609
:610
:611
:612
:613
:614
:615
:616
:617
:618
:619
:620
:621
:622
:623
:624
:625
:626
:627
:628
:629
:630
:631
:632
:633
:634
:635
:636
:637
:638
:639
:640
:641
:642
:643
:644
:645
:646
:647
:648
:649
:650
:651
:652
:653
:654
:655
:656
:657
:658
:659
:660
:661
:662
:663
:664
:665
:666
:667
:668
:669
:670
:671
:672
:673
:674
:675
:676
:677
:678
:679
:680
:681
:682
:683
:684
:685
:686
:687
:688
:689
:690
:691
:692
:693
:694
:695
:696
:697
:698
:699
:700
:701
:702
:703
:704
:705
:706
:707
:708
:709
:710
:711
:712
:713
:714
:715
:716
:717
:718
:719
:720
:721
:722
:723
:724
:725
:726
:727
:728
:729
:730
:731
:732
:733
:734
:735
:736
:737
:738
:739
:740
:741
:742
:743
:744
:745
:746
:747
:748
:749
:750
:751
:752
:753
:754
:755
:756
:757
:758
:759
:760
:761
:762
:763
:764
:765
:766
:767
:768
:769
:770
:771
:772
:773
:774
:775
:776
:777
:778
:779
:780
:781
:782
:783
:784
:785
:786
:787
:788
:789
:790
:791
:792
:793
:794
:795
:796
:797
:798
:799
:800
:801
:802
:803
:804
:805
:806
:807
:808
:809
:810
:811
:812
:813
:814
:815
:816
:817
:818
:819
:820
:821
:822
:823
:824
:825
:826
:827
:828
:829
:830
:831
:832
:833
:834
:835
:836
:837
:838
:839
:840
:841
:842
:843
:844
:845
:846
:847
:848
:849
:850
:851
:852
:853
:854
:855
:856
:857
:858
:859
:860
:861
:862
:863
:864
:865
:866
:867
:868
:869
:870
:871
:872
:873
:874
:875
:876
:877
:878
:879
:880
:881
:882
:883
:884
:885
:886
:887
:888
:889
:890
:891
:892
:893
:894
:895
:896
:897
:898
:899
:900
:901
:902
:903
:904
:905
:906
:907
:908
:909
:910
:911
:912
:913
:914
:915
:916
:917
:918
:919
:920
:921
:922
:923
:924
:925
:926
:927
:928
:929
:930
:931
:932
:933
:934
:935
:936
:937
:938
:939
:940
:941
:942
:943
:944
:945
:946
:947
:948
:949
:950
:951
:952
:953
:954
:955
:956
:957
:958
:959
:960
:961
:962
:963
:964
:965
:966
:967
:968
:969
:970
:971
:972
:973
:974
:975
:976
:977
:978
:979
:980
:981
:982
:983
:984
:985
:986
:987
:988
:989
:990
:991
:992
:993
:994
:995
:996
:997
:998
:999

```

```

2290      WAIT 1
2290      OUTPUT 3;CLEAR#;
2300      ON KEY GO TO Exit:
2310
2320      GRAPHICS ON
2330
2340      X_gdu_max:=100*MAX(1,RATIO)
2350      Y_gdu_max:=100*MAX(1,1/RATIO)
2360      LOGO 6
2370      PEN 1
2380      IF SYSTEM("PLOTTER IS")="705" THEN
2390          MOVE X_gdu_max/2,Y_gdu_max
2400          LABEL "PROCESO DE MECANIZADO"
2410      ELSE
2420          FOR I=-.25 TO .25 STEP .2
2430              MOVE X_gdu_max/2+I,Y_gdu_max
2440              LABEL "PROCESO DE MECANIZADO"
2450          NEXT I
2460      END IF
2470
2480      DEG
2490      LDIR 90
2500      CSIZE 3.5
2510      PEN 2
2520      MOVE 0,Y_gdu_max/2
2530      LABEL "Variables observadas: "&Vars
2540      LOGO 4
2550      LDIR 0
2560      MOVE X_gdu_max/2,.89*Y_gdu_max
2570      LABEL "Tiempo (min.)"
2580      LOGO 1
2590      MOVE 0,.4
2600      LABEL "Exp#;Med;
2610      *AT Med_Media= Med_Media/(1000) * RE-EXPRESADA EN VOLTIOS
2620      LABEL USING "#,DDD.D";Med_Media(*)
2630      MOVE 0,0
2640      LABEL "Mat#; " ;Her#;Av1;Avf;Avs;Vel;Pro;Lon;Dra;Frm; " ;Vars
2650      VIEWPORT .88*X_gdu_max,.98*X_gdu_max,.17*Y_gdu_max,.92*Y_gdu_max
2660      WINDOW 0,Xmax,-Ymax,Ymax
2670      AXES Xmax/100,Ymax/20,0,-Ymax/10,4,3
2680      AXES Xmax/100,Ymax/0,0,10,Ymax/1.5
2690      AXES Xmax/100,Ymax/20,Xmax,Ymax/10,4,3
2700
2710      CLIP OFF
2720      CSIZE 3.3,.5
2730      LOGO 6
2740      FOR I=0 TO 10
2750          MOVE [Xmax/10,-(Ymax+Ymax/200)
2760              LABEL USING "#,DD.D";I*Xmax/10
2770      NEXT I
2780      LOGO 9
2790      FOR I=-10 TO 10 STEP 2

```

```

2800      MOVE -xmax/200,1+ymax/10      233
2810      LABEL USINE 'n,000';1+ymax/10000
2820      NEXT I
2830      PENUP
2840      .
2850      Pluma=3
2860      PEN Pluma
2870      FOR Fila=1 TO Can
2880          FOR Columna=1 TO N3_med
2890              PLOT (Columna-1)/(Frm+60),Med,t(Fila,Columna): Sup. medida 1 en t=0
2900          NEXT Columna
2910          PENUP
2920          Pluma=Pluma+1
2930          IF Pluma>6 THEN Pluma=3
2940          PEN Pluma
2950      NEXT Fila
2960      GOTO 2960
2970 Exit: OFF KBD
2980      GRAPHICS OFF
2990      GCLEAR
3000      OUTPUT 2:Clear%;
3010      DEALLOCATE Med,t(*),Med_mediat(*)
3020      SUBEND

```

*** P) ***

```

10
20
30 *****
40 *
50 * REGISTRO CON EL VOLTIMETRO DE *
60 * LA POTENCIA DEL MOTOR DE AVANCE *
70 *
80 *****
90
100 CONSIDERACIONES: 1) Rango de medida del voltmetro 10V.
110
120
130 COM: Clear$(2)
140 INTEGER Mes, Dia, Mes, Point, Dpoint
150 DATA Jan, Feb, Mar, Apr, May, Jun, Jul, Aug, Sep, Oct, Nov, Dec
160 Clear$=CHR$(255)&CHR$(75)
170 OUTPUT 2:Clear$;
180
190
200 *****
210 * Inicializacion del Reioj *
220 *****
230
240 Fmt:IMAGE #,3A," ",2A," ",2A," ",2A,K
250 Left$=CHR$(255)&CHR$(72) ' Mueve el cursor al principio de la linea
260 OUTPUT KBD USING Fmt:"DEC",*31",*12",*80",Left$
270 LINPUT "Entre la fecha y hora con este formato",F$
280 SET TIMEDATE DATE(F$(5;2)&" "L$(1;3)&" 1985")+TIME:F$(9;5)
290
300
310 *****
320 * Condiciones del Ensayo *
330 *****
340
350 OUTPUT 2:Clear$;
360 PRINT TABXY(26,1),"CONDICIONES DEL ENSAYO"
370 INPUT "Material?";Mat$
380 PRINT TABXY(1,4);"Material: ";Mat$
390 INPUT "Herramienta?";Hers$
400 PRINT "Herramienta: ";Hers$
410 INPUT "Avance inicial (rpm)?";Avi$
420 PRINT "Avance inicial: ";Avi;"rpm"
430 INPUT "Avance final (rpm)?";Avf$
440 PRINT "Avance final: ";Avf;"rpm"
450 INPUT "Salto de Avance (rpm)?";Avs$

```

```

466 PRINT "Salto de Avance: ";Avs;"rpm"
476 INPUT "9Caja Norton?",Cjn
486 IF (Cjn=1) OR (Cjn=9) THEN 476
496 PRINT "Caja Norton: ";Cjn
506 INPUT "9Velocidad (rpm)?",Vel
516 PRINT "Velocidad: ";Vel;"rpm"
526 INPUT "9Profundidad (mm)?",Pro
536 PRINT "Profundidad: ";Pro;"mm"
546 INPUT "9Longitud (mm)?",Lon
556 PRINT "Longitud: ";Lon;"mm"
566 INPUT "9Diametro (mm)?",Dia
576 PRINT "Diametro: ";Dia;"mm"
586 INPUT "9Frec. de Muestreo (Hz)?",Frm
596 IF Frm=0 THEN 586
606 PRINT "Frec. de Muestreo: ";Frm;"Hz"
616 INPUT "SE DESEA CAMBIAR ALGUN DATO (S/N)",Conts
626 IF Conts="S" OR Conts="s" THEN GOSUB Camb:
636
646
656 *****
666 + Preparacion manual de la instrumentacion +
676 *****
686
696 OUTPUT 2;Clear$;
706 PRINT TABXY(1,5);"* Dispon el registrador grafico y anota sus escalas vert. y hor.;"
716 PRINT TABXY(1,7);"* Inserta el Disco de DATOS si no lo esta;"
726 PRINT TABXY(1,7);"* Pulse CONT para continuar;"
736 PAUSE
746 OUTPUT 2;Clear$;
756
766
776 *****
786 + Programacion del 3456A +
796 *****
806
816 ABORT 7
826 REMOTE 722
836 LOCAL LOCKOUT 7
846 ASSIGN %Volt TO 722
856 OUTPUT %Volt;"M 5M004 .1STI 5ST6 R4 2! 0;"
866 " SE considera que el rango de medida del voltmetro necesitado es 10 volt. *****
*****
876
886
896 *****
906 + Creacion del N3 de Experiencia +
916 *****
926
936 Fecha=DATE$(TIME$)
946 Hora=TIME$(TIME$)
956 Mes=;
966 READ Mes$

```



```

970 IF Mes%>Fecha$(4;3) THEN
980   Mes=Mes+1
990   GOTO 960
1000 END IF
1010 N_Exp=VAL$(Mes&Fecha$(1;2)&Hora$(1;2)&Min$(4;2))
1020 PRINT TAB(1;18); "N3 de Experiencia " ; N_Exp$
1030 '
1040 '
1050 ' *****
1060 ' + Creacion y Apertura del Fichero +
1070 ' *****
1080 '
1090 IF Cjn=3 THEN
1100   Pasos=1.187
1110 ELSE
1120   IF Cjn>3 THEN Cjn=Cjn-1
1130   Pasos=1+(Cjn-1)*.125
1140 END IF
1150 N3_Med=INT(1.05*((Frm*Lon+18.168*68)/(Pasos*(Avi+(ABS(Avi-Avi))/2))))
1160 Pot_Media=0
1170 CREATE BDAT N_Exp$,13*N3_Med,8
1180 ASSIGN @Disco TO N_Exp$
1190 OUTPUT @Disco;N3_Med,Pot_Media,Mat$,Her$,Avi,Avf,Avs,Cjn,Vel,Pro,Lon,Dia,Frm
1200 '
1210 '
1220 ' *****
1230 ' + Medicion y Registro en Disco +
1240 ' *****
1250 '
1260 PRINT TAB(1;15); "Para finalizar la adquisicion de datos pulsa CONT"
1270 PRINT TAB(1;16); "Para abortar el proceso pulsa el ESPACIADOR"
1280 Pot_tos=0
1290 N3_Med=0
1300 Med=0
1310 PAUSE
1320 PRINT
1321 PRINT
1330 ON KBD GOTO Graf
1340 ON CYCLE 1/Frm GOSUB Mide
1350 ON END @Disco GOSUB Mide_fin
1360 ON SIGNAL Fluor GOTO Graf1
1370 GOTO 1370
1380 '
1390 '
1400 ' *****
1410 ' + Almacenamiento del N3 de Medicas +
1420 ' + Listado y Graficacion de Disco +
1430 ' *****
1440 '
1450 On+OFF INCLE
1460 On+OFF HBS
1470 OFF SIGNAL Fluor

```

```

1480 OFF END @Disco
1485 LOCAL @Vol1
1490 ASSIGN @Disco TO N,exp@
1500 Pot_med:=Pot_tot/N3_med
1510 OUTPUT @Disco;N3_med,Pot_medria ' Guarda en los registros 1 y 2 el n3 de Medidas y la Potencia M
edia
1520 PRINT
1521 PRINT
1530 PRINT "Valor Medio de la Potencia ";Pot_medria
1540 INPUT "SE DESEA UN LISTADO DE LOS DATOS (S/N) ",Conts
1550 IF Conts="S" THEN CALL Listdisc@N,exp@
1560 INPUT "SE DESEA UN GRAFICO DE LA EXPERIENCIA (S/N) ",Conts
1570 IF Conts="S" THEN CALL Grafdisc@N,exp@
1580 ASSIGN @Disco TO #
1590 #
1600 #
1610 # *****
1620 # + Siguiete Experiencia +
1630 # *****
1640 #
1650 INPUT "SE DESEA REALIZAR UNA NUEVA EXPERIENCIA (S/N)",Conts
1660 IF Conts="S" THEN
1670     GOSUB Cambi
1680     RESTORE 150
1690     OUTPUT 2;Clear@;
1700     PRINT TABXY(1,5);"+ Dispon el Reg. Graf. para un nuevo registro"
1710     GOTO 810
1720 ELSE
1730     GOTO Fin
1740 END IF
2000 # =====
2010 #
2020 #
2030 # *****
2040 # + CAMBI: +
2050 # *****
2060 #
2070 Cambi: ! CAMBIOS EN LA EXPERIENCIA
2080 ON KEY @ LABEL "SELECCION" GOTO Selection
2090 ON KEY 4 LABEL "FIN" GOTO 2050
2100 OUTPUT 2;Clear@;
2110 #
2120 PRINT TABXY(23,1);"MENU DE CAMBIOS DE DATOS"
2130 PRINT TABXY(1,4);" Material: ";Mat@
2140 PRINT " Herramienta: ";Her@
2150 PRINT " Avance inicial: ";Avi;"rpm"
2160 PRINT " Avance final: ";Afi;"rpm"
2170 PRINT " Salto de Avance: ";Avs;"rpm"
2180 PRINT " Caja Norton: ";Caj
2190 PRINT " Velocidad: ";Vel;"rpm"
2200 PRINT " Profundidad: ";Pro;"mm"
2210 PRINT " Longitud: ";Lon;"mm"

```

```

2226 PRINT " * Diametro:      ";Dia;"mm" 238
2228 PRINT " * Frec. de Muestreo: ";Fm;"Hz"
2240 PRINT TABXY(1,10);"Use la rueda para seleccionar el dato - marque SELECCION"
2250
2260 " Inicializacion del puntero "
2270 Point=1
2280 PRINT TABXY(1,Point+3);"*"
2290
2300 " Desplazamiento del puntero "
2310 ON KBD GOTO Movecursor
2320 ON KNOB .1 GOTO Knob_srv
2330 Loop2:GOTO Loop2
2340 Knob_srv:K=KNOBK+KNOBY
2350 Oldpoint=Point
2360 IF K<0 THEN
2370 Point=Point-1
2380 ELSE
2390 Point=Point+1
2400 END IF
2410 GOTO Movearrow
2420 Movecursor:Response=KBD%
2430 Oldpoint=Point
2440 IF (Response(1,1)=CHR$(255)) THEN
2450 IF (Response(2,1)="V") THEN Point=Point+1
2460 IF (Response(2,1)="^") THEN Point=Point-1
2470 END IF
2480 Movearrow:IF Point<1 THEN Point=1
2490 IF Point>11 THEN Point=1
2500 PRINT TABXY(1,Oldpoint+3);"*"
2510 PRINT TABXY(1,Point+3);"*"
2520 GOTO Loop2
2530
2540 Selection:
2550 OFF KBD
2560 OFF KNOB
2570 PRINT TABXY(1,10);"( De RETURN si ya no quiere hacer el cambio )"
2580 SELECT Point
2590 CASE 1
2600 INPUT "Material?" ,Mat$
2610 CASE 2
2620 INPUT "Herramienta?" ,Her$
2630 CASE 3
2640 INPUT "Avance inicial (rpm)?" ,Avi
2650 CASE 4
2660 INPUT "Avance final (rpm)?" ,Avf
2670 CASE 5
2680 INPUT "Salto de Avance (rpm)?" ,Aus
2690 CASE 6
2700 INPUT "Caja Norton?" ,Cjn
2710 IF Cjn<1 OR Cjn>9 THEN 2700
2720 CASE 7
2730 INPUT "Velocidad (rpm)?" ,Ve!

```

```

2740 CASE 6
2750 INPUT "Profundidad (mm)",Pro
2760 CASE 9
2770 INPUT "Longitud (mm)",Lon
2780 CASE 10
2790 INPUT "Diametro (mm)",Dia
2800 CASE 11
2810 INPUT "Frec. de Muestreo (Hz)",Fm
2820 IF Fm=0 THEN 2810
2830 END SELECT
2840 GOTO 2100
2850 OFF KEY
2860 OFF KBD
2870 OFF KNOB
2880 OUTPUT 2;Clear$;
2890 RETURN
2900 '
2910 '
2920 ' *****
2930 ' + MIDE: +
2940 ' *****
2950 '
2960 Mide: ' PROCESO DE ADQUISICION DE DATOS
2970 OUTPUT 2;Volt;"T3"
2980 S=SPOLL(2;Volt)
2990 IF S(<)&B THEN GOTO 2980
3000 ENTER 2;Volt;Med
3010 N3_med=N3_med+1
3020 Pot_tot=Pot_tot+Med
3030 OUTPUT 2;Disco;Med
3040 PRINT Med,
3050 RETURN
3060 '
3070 '
3080 ' *****
3090 ' + MIDE_FIN: +
3100 ' *****
3110 '
3120 Mide_fin: ' FINALIZACION DE LA ADQUISICION DE DATOS
3130 OFF CYCLE
3140 SIGNAL Fluor
3150 N3_med=N3_med-1
3160 Pot_tot=Pot_tot-Med
3171 FOR I=1 TO 10
3172 BEEP 100*I,.3
3173 NEXT I
3180 PRINT
3190 PRINT "Ultima medida (no registrada en disco): ";
3200 RETURN
3210 F:ENDG
4000
=====
4010

```

```

4020
4030
4040
4050
4060
4070
4080 SUB E (etd=sc:N:Exp$) ! LISTA LOS RESULTADOS
4090   INTEGER Cn,N3,med
4100   ASSIGN 20:sc TO N:Exp$
4110   ENTER 20:sc;N3,med,Pot,media,Mat$,Her$,Avi,Avf,Avs,Cn,Vel,Pro,Lon,Dia,Frm
4120   PRINT N3,med;Pot,media;Mat$: " ";Her$:Avi;Avf;Avs;Cn;Vel;Pro;Lon;Dia;Frm
4130   WAIT 2
4140   ON END 20:sc GOTO 4180
4150   ENTER 20:sc;Med
4160   PRINT Med:
4170   GOTO 4150
4180   OFF END 20:sc
4190 SUBEND
4200
4210
4220
4230
4240
4250
4260 SUB Grafdisc(N:Exp$) ! DIBUJA LOS RESULTADOS
4270   OPTION BASE 1
4280   COM CLEAR$(2)
4290   INTEGER Cn,N3,med,Xmax
4300   ASSIGN 20:sc TO N:Exp$
4310   ENTER 20:sc;N3,med,Pot,media,Mat$,Her$,Avi,Avf,Avs,Cn,Vel,Pro,Lon,Dia,Frm
4320   ALLOCATE W(N3,med)
4330   ENTER 20:sc;W(*)
4340
4350   T_med=(N3,med-1)/(Frm*60) ! Duracion de la medida en minutos, se supone que la primera medida
se hace en t=0
4360   IF T_med-INT(T_med)=0 THEN
4370     Xmax=T_med
4380   ELSE
4390     Xmax=INT(T_med)
4400   END IF
4410   Pmax=MAX(W(*)) ! Potencia maxima medida
4420   SELECT Pmax
4430   CASE (=0.8
4440     Ymax=.8
4450   CASE (=1.6
4460     Ymax=1.6
4470   CASE (=4
4480     Ymax=4
4490   CASE (=8
4500     Ymax=8
4510   CASE (=16
4520     Ymax=16

```

```

4530 CASE ELSE
4540 PRINT "NO ESTA PREVISTO MEDIR MAS DE 10.0 A LA SALIDA DE LATIMETRO"
4550 WAIT 2
4560 GOTO Exit
4570 END SELECT
4580
4590 OUTPUT 2;Clear0;
4600 PRINT TABXY(1,5);"Para abortar la representacion o continuar pulsar el ESPACIADOR"
4610 WAIT 1
4620 ON KBD GOTO Exit
4630 OUTPUT 2;Clear0;
4640
4650 GINIT
4660 PLOTTER IS 3,"INTERVAL"
4670 GRAPHICS ON
4680
4690 LORG 6
4700 X_gdu_max=100*MAX(1,RATIO)
4710 Y_gdu_max=100*MAX(1,1/RATIO)
4720 FOR I=-.3 TO .1 STEP .1
4730 MOVE X_gdu_max/2+.1*Y_gdu_max
4740 LABEL "POTENCIA ELECTRICA"
4750 NEXT I
4760 DEG
4770 LOIR 90
4780 CSIZE 3.5
4790 MOVE 0,Y_gdu_max/2
4800 LABEL "Potencia"
4810 LORG 4
4820 LOIR 0
4830 MOVE X_gdu_max/2,.07*Y_gdu_max
4840 LABEL "Tiempo (min.)"
4850 LORG 1
4860 MOVE 0,0
4870 LABEL "N_exp;N3_med;
4880 LABEL USING "0,00,00";Pot_media
4890 LABEL " ";Mat0;" ";Mer0;Av1;Avf;Avs;Cun;Ve1;Pro;Lon;O;a;Frm
4900
4910 VIEWPORT .1*X_gdu_max,.98*X_gdu_max,.15*Y_gdu_max,.9*Y_gdu_max
4920 WINDOW 0,Xmax,0,Ymax
4930 AXES Xmax/100,Ymax/40,0,0,0,0,5,3
4940 AXES Xmax/100,Ymax/40,Xmax/2,Ymax/2,10,5,3
4950 AXES Xmax/100,Ymax/40,Xmax,Ymax,10,5,3
4960 GRID Xmax/10,Ymax/0,0,0,0,0,0,1.3
4970
4980 CLIP OFF
4990 CSIZE 3.3,.5
5000 LORG 6
5010 FOR I=0 TO 10
5020 MOVE I*Xmax/10,-Ymax/200
5030 LABEL USING "0,00,00";I*Xmax/10
5040 NEXT I

```

```
5050      LORG 8
5056      FOR I=0 TO 8
5070          MOVE -kmax/200,I*Ymax/8
5080          LABEL USING "0,00.0";I*Ymax/8
5090      NEXT I
5100      PENCUF
5110
5120      FOR J=1 TO N3.med
5130          PLOT (I-1)/(Frm*60),W(I): Sup. Medida 1 en t=0
5140      NEXT J
5150      GOTO 5150
5160 Exit: OFF KBD
5170      GRAPHICS OFF
5180      OUTPUT 2:Clear%;
5190      SUBEND
```

REFERENCIAS

REFERENCIAS

- 1.- MICHELETTI, G. F. "Tecnologia Meccanica: Il Taglio dei Metalli". Vol. .1, 2a edición; Unione Tipografico Editrice Torinese, Turín, 1977.
- 2.- TRENT, E. M. "The relationship between machinability and tool wear". Proceedings of the Conference on Machinability, pág. 179-184. Londres. Octubre 1965.
- 3.- BANDYOPADHYAY, P. "On line drill life monitoring via dynamic data system methodology". The Univ. of. Wisconsin-Madison, Ph. D., 1983.
- 4.- COOK, N. H. "Tool wear and tool life". Journal of Engineering for Industry, TRANS. ASME, pag. 931, Noviembre 1973.
- 5.- BOOTHROYD, G. ". Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools". 1a Ed., Mc Graw-Hill, 1975.
- 6.- "Ensayos de duración de herramientas de torno de corte único". Norma UNE, 16-148-85. Instituto Español de Normalización. Febrero 1985.
- 7.- "Tool-life testing with single point turning tools".

Norma ISO 3685. 1a Edición 1977.

- 8.- OBERG, E.; JONES, F. D.; HORTON, H. L. "Manual Universal de la Técnica Mecánica". Editorial Labor, 2a Ed., Barcelona 1984.
- 9.- MICHELETTI, G. F. "Relationship between cutting forces and tools wear in steel turning". 7th International Machine Tool Design and Research Conference. Birmingham; 1966.
- 10.- MICHELETTI, G. F.; DE FILIPPI, A.; IPPOLITO, R. "Tool wear and cutting forces in steel turning". CIRP International Conference on Manufacturing Technology. Ann Arbor, 1967.
- 11.- DE FILIPPI, A.; IPPOLITO, R. "Analysis of the correlation among: cutting forces variation (VS time); chip formation parameters; machinability". Asamblea General del CIRP ; Estocolmo. 1972.
- 12.- WOLF, W.; MAGADANZ, P. "Feed force monitoring for operation security and reliability". SME 1981 International Tool y Manufacturing Engineering Conference. Detroit, Michigan, 1981.
- 13.- LANGHAMMER, K. "Fuerzas de corte como parámetros para determinar el desgaste de la herramienta de carburo en tornos y como criterio de mecanicibilidad de aceros". Metales y

Máquinas, Agosto 1977.

- 14.- ALBRECHT, P. "An explanation of the formation of groove wear on cutting tools". *Microtecnic*, vol. 10, num. 3, pág. 145-148. 1956.
- 15.- SHAW, M. C.; COOK, N. H.; SMITH, P. A. "Putting machinability data at work". *Tool Engineer*; vol. 35, pág. 81-86. 1955.
- 16.- TAKEYAMA, H.; MURAI, T.; USUI, E. "Study on wear processes of carbide tools". *Journal of Mechanical Laboratory of Japan*, vol. 2, num. 2, pág. 14-24. 1956.
- 17.- COLDING, B. N. "A wear relationship for turning, milling and grinding". Estocolmo 1959.
- 18.- OPITZ, H. "Tool tip temperatures and chemical reactions in the contact zone". *Anales del CIRP*, vol. 2, pág. 39-46. 1953.
- 19.- SHAW, M. C.; DIRKE, S. O. "On the wear of cutting tools". *Microtecnic*, vol. 10, num. 4. pág 187-193. 1946.
- 20.- TRIGGER, K. J.; CHAO, B. T. "Temperature distribution at tool chip and tool work interface in metal cutting". *Memo-ria ASME* num. 56-A-87. 1956.

- 21.- CHAO, B. T.; TRIGGER, K. J. "Temperature distribution at tool-chip and tool-work interface in metal cutting". Trans. ASME, vol. 80, pág. 311-320. 1958.
- 22.- ZAKARIA, A. A.; ELGOMAYEL, J. I. "On the reliability of the cutting temperature for monitoring tool wear". Int. J. of Mach. Tool Des. Res., vol. 15, pág. 195-208. 1975.
- 23.- BOOTHROYD, G.; EAGLE, J. M.; CHISHOLM, A. W. J. "Effect of tool flank wear on the temperatures generated during metal cutting". 8th International M.T.D.R. Conference, vol. 1, pág. 667-680. 1967.
- 24.- EUGENE, M. F. "Contribution to the study of the resistance to wear of cutting tools". Microtecnic, vol. 7, num.3, pág. 122-126. 1953.
- 25.- TRIGGER, K. J.; CHAO, B. T. "Mechanism of crater wear on cemented carbide tools". Trans. ASME, vol. 78, pág. 1119-1126. 1956.
- 26.- LOLADZE, T. N. "L'interazione fra utensile e pezzo durante il taglio". Industrie Anzeiger, vol. 62, 1959.
- 27.- DAWIHL, W. "Investigation of wear processes of carbide tools". Z. Tech. Phys., vol. 21, pág. 336, 1940.

- 28.- DAWIHL, W. "Influence of diffusion and alloy formation on resistance to wear of cemented carbide compositions". Z. Tech. Phys. vol. 21, pág. 44-48, 1940.
- 29.- DAWIHL, W. "Study of wear of cemented carbides". Stahl und Eisen, vol. 61, pág. 210-223. 1941.
- 30.- TRENT, M. E. "Factors affecting wear in cemented carbides". The Machinist, pág. 1651, 1951.
- 31.- TRENT, M. E. "Some factors affecting wear on cemented carbides tools". Proc. Inst. Mech. Engrs., vol. 166, pág. 64-74, Londres 1952.
- 32.- HOLM, R. J., appl. Phys., vol. 19, pág. 361, 1948.
- 33.- SHAW, W. C. "The assessment of machinability". Proceedings of the Conference on Machinability, pág. 1-9, Londres, Octubre 1965.
- 34.- TRENT, E. M. "Tool wear machinability". The Production Engineer, vol. 38, num. 3, pág. 105, Londres 1959.
- 35.- CHERRY, J. "Practical investigation in metal cutting". The Production Engineer, vol. 41, num. 2, pág. 90, Londres 1962.

- 36.- BOWDEN, F. P.; TABOR, D. "Friction and lubrication of solids". Oxford University Pres., Londres 1954.
- 37.- CASSIN, C.; BOOTHROYD, G. "The lubricating action of cutting fluids". J. Mech. Eng. Sci., vol. 7, num. 1, pág. 67-81. Gran Bretaña, Marzo 1965.
- 38.- TRENT, E. M. "Metalurgical changes at the tool/work interface". Proceeding of the Conference on Machinability; pág. 77-87, Londres, Octubre 1965.
- 39.- HOLMES, P. M. "Factors affecting the selection of cutting fluids". Industr. Lubrication and Tribology, vol. 23, num. 2, pág. 47-55, Febrero 1971.
- 40.- VERGNAS, J. "Usinage. Technologie et pratique". Editorial Dunod. Paris 1982.
- 41.- ZOREV, N. N.; TASHLITSKY, N. I. "Effect of the secondary shear zone on high-speed cutting tools". Proceedings of the Conference on Mchinability; pág. 31-34, Londres, Octubre 1965.
- 42.- OPITZ, H.; KONIG, W. "Basic research on the wear of carbide cutting tool". Proceedings of the Conference on Machinability, pág. 35-42, Londres 1965.

- 43.- SVAHN, O. "Wear of cutting tools and tool life". Proc. of the Inst. Prod. Eng. Res. Conference, pág. 120-129, Pittsburgh. 1963.
- 44.- VENKATESH, V. C. "Wear studies on TIC coated cemented titanium carbide tools". Transaction of the ASME; J. Eng. Mat. and Tech., vol. 106, num. 1, pág. 84-87. Enero 1984.
- 45.- TAYLOR, F. W. "On the art of cutting metals". Trans. ASME, vol. 28, pág. 31-350, 1907.
- 46.- COLDING, B.; KONIG, W. "Validity of the Taylor equation in metal cutting". Anales del CIRP, vol. 18, 1970.
- 47.- KIENZLE, O.; VICTOR, H. "Zerspanungstechnische Grundlagen für die kräftmäßige Berechnung und den Einsatz von Drehbänken Hobelmaschinen und Bohrmaschinen". Werkstattstechnik und Maschinenbau, vol. 46, num. 6, pág. 281-288, 1956.
- 48.- CHAO, B. T.; BISACRE, G. H. "The effect of speed and feed on the mechanics of metal cutting". Proc. Inst. Mec. Eng., vol. 165, pág. 1-13, Londres 1951.
- 49.- BARROW, G. "Tool life equation and machining economics". Universidad de Manchester, Inst. of Sc. and Tech., 1974.

- 50.- KRONENBERG, M. "Machining science and application". Pergamon Press, Oxford 1966.
- 51.- KRONENBERG, M. "Replacing the Taylor formula by a new tool life equation". Int. Conf. on Mach. Tool Design and Res., pág. 10, 1971.
- 52.- PELAEZ, J. "La máquina-herramienta (IV)". Metalurgia y Electricidad, num. 574, pág. 58-70, Enero 1986.
- 53.- SHALLBROCH, H.; SCHAUMANN, H. VDI Z. vol. 81, pág. 325, 1937.
- 54.- VAIDYANATHAN, S. "Predicting tool-life equation from temperature measurement". The International Journal of Production Research, vol. 8, num. 1, Londres 1970.
- 55.- CIMADEVILA, E. "Análisis del efecto termopar en interfases metálicas para la caracterización de procesos de mecanizado". Tesina, Universidad Complutense, Noviembre 1985.
- 56.- CIMADEVILA, E.; CERES, R.; IBÁÑEZ, A.; BARRIOS, L. J.; CALDERON, L. "Aproximación a la evaluación de las condiciones de mecanizado por medida de la temperatura de contacto". IV Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. Diciembre 1985. An. de Ing. Mec. Año 3, Num. 2, pág. 65-70.

- 57.- VENUVINOD, P. K.; LAU, W. S.; RUBESTEIN, C. "The role of discrete contact at the flank wear land in determining cutting tool temperature in orthogonal cutting". Int. J. Mach. Tool Des. Res., vol. 23, num. 4, pág. 245-261, 1983.
- 58.- WOXEN, R. "A theory and an equation for the life of lathe tools". Ingenior Sve Tenskaps Akademien Handligar, num. 119, Estocolmo 1932.
- 59.- WOXEN, A. "Tool life and balance of heat in lathe work". Proc. Roy. SWEDISH Inst. for Eng. Res., num. 142, 1937.
- 60.- WHITEHEAD, J. "The chip equivalent method of cutting tool life prediction". M. Sc. Dissertation University of Manchester, 1970.
- 61.- COLDING, B. N. "A three-dimensional tool-life equation machining economics". Trans. ASME. Journal of Eng. for Ind., pág. 239-250, 1959.
- 62.- KONIG, W.; DEPIEREUX, W. R. "Wie lassen sich Vorschub und Schnittgeschwindigkeit optimieren". Industrie Anzeiger, 1481. 1969.
- 63.- DEPIEREUX, W. R. "Ermittlung optimaler Schmittbedingungen". Industrie Anzeiger 711, 1970.

- 64.- TAKEYAMA, H.; MURATA, R. "Basic investigation of tool wear"
. Journal of Engineering for Industry. Trans. of ASME,
vol. 83, pág. 33-38, 1963.
- 65.- HO, L. E.; CHEN, N. N. S. "Prediction of wear of carbide
cutting tool". Int. J. Prod. Res., vol. 15, num. 3, pág.
277-290, 1977.
- 66.- LEE, Y. S. "Theoretical model of crater wear". Journal of
Engineering for Industry, Trans. of ASME, pág. 1051, No-
viembre 1971.
- 67.- KOREN, Y. "Flank wear model of cutting tools using control
theory". J. of Eng. for Ind., Trans. ASME, vol. 100, pág.
103, Febrero 1978.
- 68.- LENZ, E.; KATZ, Z.; BER, A. "Investigation of the flank
wear of cemented carbide tools". J. of Eng. for Ind., Tran-
s. ASME, pág. 246, Febrero 1976.
- 69.- WU, S. H. "Tool life testing by response surface methodo-
logy- parts I an II". J. of Eng. for Ind., Trans. ASME,
vol. 86, pág. 1005, 1964.
- 70.- COLDING, N. B. "Milling tool-life and its relations". STC
"C" Discussion paper, Agosto 1980.

- 71.- KULJANIC, E.; RIJERKA, E.; SOLAJA, V. "Random strategy methods for determining tool life equation". *Anales del CIRP*, vol. 29, pág. 351, Enero 1980.
- 72.- WILLIAMS, R. A.; MEGILCHRIST, C. A. "An experimental study of drill life". *International Journal of Production Research*, vol. 10, num. 2, pág. 175-191, 1972.
- 73.- LORENZ, G. "A contribution to the standardization of drill performance tests". *Anales del CIRP*, vol. 26, Num. 1, pág. 39, 1977.
- 74.- BHATTACHARYYA, A.; GHOSH, A.; HAM, I. "Analysis of tool wear- part II, Applications of flank wear models". *J. of Eng. for Ind., Trans. ASME*, pág. 109, Febrero 1970.
- 75.- WAGER, J. G.; BARASH, M. "Study of the distribution of the life of the HSS tools". *J. of Eng. for Ind., Trans. ASME*, pág. 1074, Noviembre 1971.
- 76.- DEVOR, R. E.; ANDERSON, D. L.; ZDEBLICK, W. J. "Tool life variation and its influence on the development of tool life models". *J. of Eng. for Ind., Trans. ASME*, pág. 577, Agosto 1977.
- 77.- RAMALINGAM, S.; WATSON, J. D. "Tool life distributions- parts, I to IV". *J. of Eng. for Ing., Trans. ASME*, pág.

519-531, Agosto 1977, pág. 193-209, Mayo 1978.

78.- HITOMI, K.; NAKAMURA, N.; INOVE, S. "Reliability analysis of cutting tools". J. of Eng. for Ind., Trans. ASME, vol. 101, pág. 185, Mayo 1979.

79.- LACOMMARE, U.; NOTOLADIEGA, S.; PASSANNANTI, A. "Optimum tool replacement policies with penalty cost for unforeseen tool failure". Int. J. Mac. Tool Des. Res., vol. 23, num. 4, pág. 237-243, 1983.

80.- NOVAK, A. "The concept of artificial intelligence in unmanned production - application of adaptive control". Proceedings of the 2nd International Conference on Flexible Manufacturing Systems, pág. 669-679, Octubre 1983.

81.- EVERSHEIM, W.; MUELLER, V. "Automated supervision. An important condition for quality and reliability in unattended manufacturing". E.A. Warman, Lape 83, North-Holland. Publishing Company, Amsterdam 1983.

82.- TLUSTY, J.; ANDREWS, G. C. "A critical review of sensors for unmanned machining". Anales del CIRP, vol. 32, num. 2, 1983.

83.- SCHAFFER, G. "Sensors: the eyes and ears of CIM". American Machinist. Special report 756, Julio 1983.

- 84.- TOME, D. M. "Adaptive control sensors for manufacturing systems: an overview". Control Engineering, Agosto 1984.
- 85.- ARSOVSKI, S. M. "Wear sensors in the adaptive control systems of machine tools". Int. J. Prod. Res., vol. 21, num. 3, pág. 347-356, Mayo/Junio 1983.
- 86.- MICHELETTI, G. F.; KONIG, W.; VICTOR, H. R. "In process tool wear sensors for cutting operations". Anales del CIRP, vol. 25, num. 2, pág. 483-496, 1976.
- 87.- FURUKAWA, Y. "Trends seen in machine tool technology 2". Metalworking Engineering and Marketing, pág. 38-46, Julio 1981.
- 88.- YEN, D. W.; WRIGHT, P. K. "Adaptative control in machining- a new approach based on the physical constraints of tool wear mechanisms". Trans. ASME, J. of Eng. for Ing., vol. 105, pag. 31-38, Febrero 1985.
- 89.- RIOS, L.; VIZAN, A. "Sistema de control para la optimización de las condiciones de corte en procesos de fresado". II Simposio Nacional sobre Automática en la Industria, Zaragoza, Noviembre 1984.
- 90.- WECK, M. "Sensors, diagnostic methods and systems for ap-

plication in manufacturing systems". International Congress for Metal Working and Automation, pag. 80-86, Sept. 18-19, Hannover 1985.

- 91.- BARRIOS, L. J.; ALIQUÉ, J. R.; ROS, S.; CERES, R.; CALDERON, L. "La monitorización de la potencia eléctrica como un paso hacia el mecanizado desatendido". IV Cong. Nac. de Ing. Mec., Diciembre 1985, An. de Ing. Mec., Año 3, num. 1, pág. 49-53.
- 92.- BARRIOS, L. J.; ALIQUÉ, J.; ROS, S.; CERES, R.; CALDERON, L. "La monitorización de la potencia eléctrica como un paso hacia el mecanizado desatendido". Pendiente de publicación en Novamáquina.
- 93.- HEISEL, U. "Tool and workpiece monitoring processes in the automated production process". Informe "Flexible Automation" de Werner.
- 94.- ROE, J. "Touch trigger probes on machine tools". Proc. of the 2nd Int. Conf. on Flexible Manufacturing Systems, Londres, Octubre 1983.
- 95.- PUERTO, J. "Tendencia moderna para la mejora de la efectividad de la máquina-herramienta". Metalurgia y Electricidad, num. 567, Mayo 1985.

- 96.- HITA, R. "Widax-multiflex un sistema de herramientas para la fabricación flexible". Metalurgia y Electricidad, num. 567, Mayo 1985.
- 97.- HAYASHI, S. R.; THOMAS, C. E.; DAVIS, R. K.; MCHNIGHT, W. S.; ROBERTS, C. R. "Automatic tool touch and breakage detection in turning". International Congress for Metal Working and Automation, pag. 96-101, Sept. 18-19, Hannover 1985.
- 98.- BATH, M.; SHARP, R. "In-process control of lathes improves accuracy and productivity". 9th Int. MTDR Conf., Part 2, pág. 1209-1221, 1968.
- 99.- STAFERLE, T. H.; BELLMAN, B. "Wear sensors for adaptive control in turning". Werkstatt und Betrieb, vol. 8, pág. 577.
- 100.- "Adaptive-Control-Systeme bei spanendem und abtragenden bearbeitungsverfahren". Industrie-Anzeiger 96, 74, pág. 1696-1710, 1974.
- 101.- TARAMAN, K.; SWANDO, R.; YUMAUCHI, W. "Relationship between tool forces and flank wear". Technical paper, num. MR74,- 1974.
- 102.- WECK, M. "Adaptive control in turning". Paper 7.15 Machine

Tool Controls, vol. 4 of Technology of Machine Tool Lawrence Livermore, Octubre 1981.

- 103.- KLUFT, W. "Tool monitor system". Información técnica de PROMETEC.
- 104.- HEISEL, U. "Automatische Werkzeugverschleiss-und-bruchuberwachung beim bohren und frasen". Werkstatt and Betrieb, vol. 114, num. 8, pág. 523-525, 1981.
- 105.- RIOS, L.; VIZAN, A.; GALLEGO, A. "Influencia de la geometría del proceso y de los parámetros de mecanizado en operaciones de taladro". Anales de Ingeniería Mecánica, Año 2, vol. 2, 1984.
- 106.- LOPEZ, T. "Medición de esfuerzos de corte generados en los procesos de mecanizado por arranque de viruta. Transductor extensométrico de dos componentes". An. de Ing. Mec., Año 3, num. 1, IV Congr. Nac. de Ing. Mec., Diciembre 1985.
- 107.- IBAÑEZ, A.; BARRIOS, L. J.; CIMADEVILA, E.; CERES, R. "Medición en proceso de esfuerzos de corte en máquinas-herramienta". Pendiente de publicación.
- 108.- HINDS, B. K. "Control of tool wear during metal cutting using a computer and on-line measurements". Int. J. Prod.-Res., vol. 15, num. 3, pág. 291-301, Mayo 1977.

- 109.- CIMADEVILA, E.; CERES, R.; IBÁÑEZ, A.; BARRIOS, L. J.; CALDERON, L. "Aproximación a la evaluación de las condiciones de mecanizado por medida de la temperatura de contacto". Pendiente de publicación en Novamáquina.
- 110.- UHLMAN, W. T.; SEHMENK, M. J. "Torque controlled machining for numerical control machining centers". Machine tools Conf. IEEE 1981.
- 111.- MATSUSHIMA, K.; BERTOK, P.; SATA, T. "In-process detection of tool breakage by monitoring the spindle current of a machine tool". Measurement and control for batch manufacturing (Papers selected from Proceedings of ASME Winter Annual Meeting), ASME, pág.145-154, 1982.
- 112.- WELLER, E. J.; WEICHBRODT, B. "Listen to your tools - They are talking to you". The Tool and Manufacturing Engineer, Julio 1967.
- 113.- GILLIS, P. P.; HASMSTAD, A. M. "Some fundamental aspects of the theory of acoustic emission". Materials Science and Eng., vol. 14, pág. 103-108, 1974.
- 114.- IWATA, K.; HORIWAKI, T. "An application of acoustic emission measurement to in-process sensing of tool wear". Annals of the CIRP, vol. 25, pág. 21-26, 1977.

- 115.- YIH-HSING PAO "Theory of acoustic emission". ASME Winter Annual Meeting, AMD, vol. 29, pág. 107-128, 1978.
- 116.- KAHN, S.; MILLER, D. "Acoustic emission detection". The Western Electric Eng., pág. 3-12, Octubre 1979.
- 117.- DORNFELD, D. A.; KANNATEY-ASIBU, E. "Acoustic emission during orthogonal metal cutting". Int. J. Mech. Sci., vol. 22, num. 5, pág. 285-296, 1980.
- 118.- KANNATEY-ASIBU, E.; DORNFELD, D. A. "Quantitative relationships for acoustic emission from orthogonal metal cutting". J. of Eng. for Ind. Trans. of the ASME, vol. 103, num. 3, pág. 330-340, Agosto 1981.
- 119.- KIM, B. S. "Punch press monitoring with acoustic emission (AE) part I: Signal characterization and stock hardness effects". J. of Eng. Mat. and Tech., Trans. ASME, vol. 105, num. 4, pág. 295-300, Octubre 1983.
- 120.- KIM, B. S. "Punch press monitoring with acoustic emission (AE) part II: Effects of process variables". J. of Eng.-Mat. and Tech., Trans. ASME, vol. 105, num. 4, pág. 301-306, Octubre 1983.
- 121.- LAN, M. S., DORNFELD, D. A. "In-process tool fracture de-

- tection". J. of Ing. Mat. and Tech, Trans. ASME, vol. 106, num. 2, pag 111-118, Abril 1984.
- 122.- "Detección de fallos mediante emisión acústica". Proyecto 2000, num. 14, Enero/Febrero 1986.
- 123.- WILKINSON, A. J. "Electrical properties of the tool/work-piece interface in metal cutting and their application to in-process measurement of tool wear". Ph. D. thesis Queen's University of Belfast 1969.
- 124.- WILKINSON, A. J. "Constriction-resistance concept applied to wear measurement of metal cutting tools". Proc. IEEE., vol. 118, num. 2381-386, 1971.
- 125.- SAKAI, E.; YODA, N.; OGURA, K. "Research on tool wear sensing". J.S.M.E., num. 740-15, pág. 209-212, 1974.
- 126.- VEHARA, K. "New attempts for short time tool-life testing". Annals of the CIRP, vol. 22, num. 1, 1973.
- 127.- MARTIN, P. "Evaluation de l'usure d'un outil de tour par l'intermédiaire de la puissance vibratoire de l'outil". Mecanique Materiaux Electricité, num. 400, pág. 51-54, Junio 1983.
- 128.- KONCZAKOWSKI, A. L. "The matrix of power spectra levels of

- turned surfaces roughness". Int. J. Mach. Tool Des. Res., vol. 23, num. 213, pág. 161-167, 1983.
- 129.- WONG, W. C. K.; MIDDLETON, D. "On the estimation of parameters for a nonlinear model of a milling process". Int. J. Prod. Res., vol. 22, num. 2, pág. 247-252, 1984.
- 130.- RAJA, J.; WHITEHOUSE, D. J. "An investigation into the possibility of using surface profiles for machine tool surveillance". Int. J. Prod. Res., vol. 22, num. 3, pág. 453-466, 1984.
- 131.- WYMAN, K. R. "Choosing the right servodrive: AC or DC". Robotics World, Julio/Agosto 1984.
- 132.- "DC Motors, Speed Controls, Servo Systems". 5a. Ed., Electro-Craft Corporation, Minnesota, 1980.
- 133.- OTT, H. W. "Noise Reduction Techniques in Electronic Systems". John Wiley and Sons, 1976.
- 134.- "Geometría de la parte activa de las herramientas de corte". Norma UNE 16-149-82, Instituto Español de Normalización.
- 135.- "Máquinas-herramienta, conceptos". Norma UNE 15001, Instituto Español de Normalización.