

Investigación Industrial sobre Monitorización Inteligente y en Red de Procesos de Taladrado de Alto Rendimiento de Componentes Aeronáuticos Especiales

Rodolfo Haber

Centro de Automática y Robótica (UPM-CSIC)

Septiembre 2010

Resumen

Desde hace ya 30 años se investiga y desarrolla intensamente estrategias de monitorización y control de los procesos de fabricación. Se han producido en los laboratorios de investigación resultados muy notables. Sin embargo, su desarrollo industrial y comercialización está siendo, a día de hoy, todavía limitada. Lo peor es que no se vislumbra ningún cambio que nos permita pensar que esta situación actual vaya a cambiar en el próximo futuro. Existen razones muy diversas. En este estudio se revisa el estado del arte y se propone una arquitectura. Se analiza la falta de robustez de los sensores y los algoritmos de monitorización actuales. Las mediciones directas en proceso son casi imposibles debido al ambiente tan hostil en el que desarrolla el mecanizado: presencia de virutas, fluidos, ruidos, vibraciones, entre otros. Las medidas indirectas que recurren, como ya se ha comentado, a modelos mecánicos o empíricos fallan a menudo debido a las perturbaciones y no linealidades inherentes a los procesos de fabricación. Sin embargo, este estudio ha servido para generar conocimientos científicos técnicos clave y han permitido identificar líneas de actuación futura muy prometedoras. Dos direcciones de investigación muy claras de cara al futuro serán el desarrollo de sistemas de monitorización y control embebidos en los CNC actuales y la utilización de las redes de datos, en especial inalámbricas, en aquellos sistemas que lo permitan. Los sistemas embebidos vuelven a demandar arquitecturas abiertas con nuevos protocolos. Hay que hacer notar aquí que numerosos fabricantes de CNC no disponen aún de sistema CNC con arquitecturas abiertas. La influencia de las redes de comunicación será enorme en el futuro. La localización de los talleres, de las máquinas y de los procesos dejará de tener importancia. La estandarización y flexibilidad serán otros factores importantes sobre todo a la hora de embeber sistemas sensoriales y de control en los CNC actuales y futuros. Finalmente diremos que las comunicaciones inalámbricas tendrán un papel esencial en esas redes, disminuyendo los costes y los tiempos de puesta en operación de estos sistemas de monitorización, control y supervisión de los procesos de alto rendimiento. Los nuevos procesos de alto rendimiento y otros similares suponen un nuevo reto a los que habrá que enfrentarse en el próximo futuro.

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN.....	1
I.2. Situación actual. Estado de la técnica a nivel mundial	1
I.3. Resultados obtenidos.....	4
I.3.1 Tecnologías más significativas desarrolladas en el proyecto.	4
I.5. Plan de trabajo.....	5
I.5.2 Estudio de los procesos de mecanizado de alto rendimiento.....	5
I.5.3 Estudio de los sistemas de monitorización y supervisión en red del proceso taladrado de alto rendimiento. ...	17
I.5.4 Estudio del acabado en los procesos de taladrado de alto rendimiento.	19
I.5.6 Estudio y caracterización del proceso de taladrado de alto rendimiento (TAR). Requisitos de los sistemas inteligentes de monitorización en red del TAR.	23
II. CONCLUSIONES. TRABAJOS FUTUROS.	30
I.5.7 Referencias analizada primer fase.	31
I.5.8 Referencias analizadas segunda fase.	33

I. INTRODUCCIÓN

El principal objetivo de este informe es mostrar los resultados en la **investigación industrial sobre la monitorización inteligente y en red del proceso de taladrado de alto rendimiento. Específicamente se ha estudiado la problemática de estos procesos.** La actividad se ha centrado en el aprovechamiento de la sinergia entre la utilización óptima de centros de mecanizado de alto rendimiento de última generación, la utilización eficientes de herramientas de corte, las estrategias avanzadas de medición, fusión sensorial y procesamiento a través de redes de inalámbricas, y el diseño de métodos de monitorización inteligente del proceso.

Este **objetivo técnico** ha incluido otras metas científico-técnicas tales como:

- Generación de conocimientos técnicos (*know-how*) que permitan el desarrollo de tecnología convergente que apunte hacia la fabricación inteligente, adaptativa y en red de componentes aeronáuticos especiales, cuyo enfoque en el sector aeronáutico no ha sido abordado con anterioridad en España, considerando el caso específico de antenas para la próxima generación de equipos embarcados en aviones.
- Generación de conocimientos técnicos en el campo de los sensores y las redes inalámbricas, relacionados con la evaluación de la información sensorial en los procesos de taladrado de alto rendimiento.
- Estudio de una técnica para las monitorización inteligente de los procesos de taladrado de alto rendimiento.

I.2. Situación actual. Estado de la técnica a nivel mundial

La industria manufacturera es un sistema social y técnico dinámico, que está funcionando en un entorno turbulento, que se caracteriza por continuos cambios en todos los niveles, desde la red de sistemas de fabricación hasta las fábricas, los sistemas de producción, máquinas, componentes y procesos técnicos. Recientemente la plataforma tecnológica europea MANUFUTURE [42] la necesidad de desarrollar e implementar estrategias para el sector de fabricación basadas en la investigación y en la innovación que permitan a nivel funcional el aprovechamiento efectivo de la complementariedad y de las sinergias provenientes de diferentes áreas científicas y tecnológicas. En este sentido, la fabricación adaptativa constituye un nuevo paradigma orientado a la continua y permanente adaptación de los sistemas de fabricación a través de una rápida aplicación de soluciones novedosas. La fabricación adaptativa está basada en **el conocimiento y la inteligencia** y se sustenta en el estado de la técnica de la fabricación y en las tecnologías de la información y las comunicaciones. La aplicación de la denominada "Fábrica Adaptativa" conduce hacia un nuevo tipo de fábrica con **una mejor respuesta ante las turbulencias y permanente evolución del entorno a través del desarrollo de sistemas con auto-aprendizaje, cooperativos y auto-optimizables.**

En una posición similar, el Departamento de Defensa de EEUU y la *National Science Foundation* (NSF) con el patrocinio de los más importantes fabricantes de máquinas herramienta y equipamiento auxiliar, y la asesoría de las cinco universidades politécnicas más importantes en Estados Unidos lanzaron en el período 2004-2007 la *Iniciativa para la Investigación y el Desarrollo de una Plataforma para una Máquina Inteligente* (SMPI, en inglés) [11]. A través de esta iniciativa se identificaron **cinco áreas prioritarias de investigación** y decenas de líneas de investigación susceptibles de ser financiadas, a saber: definición de proceso y diseño, **equipamiento inteligente y control de procesos, monitorización del proceso y seguridad** y entorno integrado para el mecanizado inteligente, su diseño e implementación (ver **figura 1**). Esta iniciativa permitirá

alcanzar a medio plazo incrementos en la productividad, los productos llegarán más rápidamente al mercado ya que los ciclos de producción serán más cortos y se podrán fabricar piezas y productos más complejos y con una mejor calidad. Precisamente, **los métodos de fabricación basados en conocimiento y que aprovechen la sinergia entre métodos y técnicas provenientes de diferentes áreas del saber, serán componentes críticos para alcanzar cambios cualitativos en los niveles productivos..**

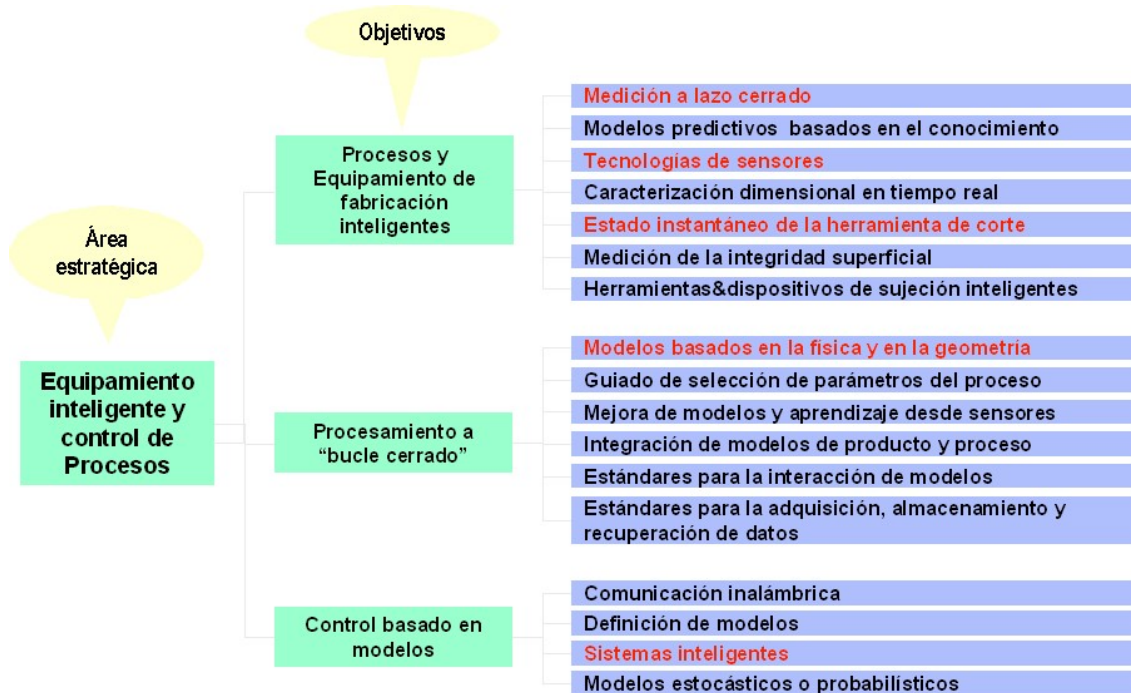


Figura 1. Área prioritaria de investigación y desarrollo para el DARPA-NSF

A partir de los años 80 los nuevos requisitos de calidad en las piezas fabricadas, para sectores estratégicos como el aeronáutico y el aeroespacial, y su implicación en la seguridad de las naciones desarrolladas fueron el motor impulsor de la revolución en el sector de la máquina-herramienta y potenciaron el diseño de nuevas máquinas y sistemas de ayuda a la programación/fabricación (CAD/CAM) que permitieron a las empresas cumplir en las etapas de fabricación con las especificaciones deseadas.



Figura 2. Situación actual en los procesos de fabricación en el sector metal-mecánico.

A partir de entonces nuevos conceptos y estrategias de diseño mecánico de los elementos de las máquinas herramienta, el rediseño desde los accionamientos hasta el control numérico por computador, el desarrollo de sofisticados sistemas de ayuda a la programación y fabricación, el desarrollo de nuevos sensores y actuadores y los progresos en los sistemas inteligentes de monitorización y supervisión de los procesos de mecanizado han puesto en manos de las empresas dedicadas a la fabricación de componentes para el sector aeronáutico y aeroespacial, nuevos retos [4]. De este modo, **la sinergia entre todas estas técnicas, métodos, recursos computacionales y maquinaria disponibles permitirán desarrollar nuevas estrategias de fabricación como tecnologías clave para el futuro inmediato de las PYMEs.**

El taladrado es uno de los procesos más comunes en el mecanizado, **que representa hasta el 50% de todos los procesos de mecanizado.** A pesar de estas estadísticas, el taladrado aún no ha recibido toda la atención del sector industrial de la fabricación con respecto a los numerosos beneficios potenciales de la monitorización de los procesos de taladrado.

Estos beneficios, con gran impacto en una PYME, **incluyen la reducción del tiempo de ciclo de producción, de las roturas de las herramientas (brocas), y en general una reducción del coste de producción, además de mejoras en la calidad final de los componentes.** Esta última cuestión es esencial para un sector como el aeronáutico.

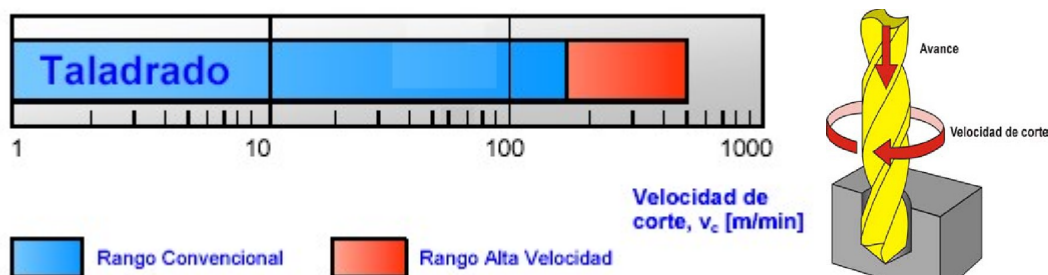


Figura 3. El proceso de taladrado de alto rendimiento

Sí intentamos establecer un orden de prioridad de las operaciones de mecanizado más habituales, una aproximación válida sobre la base de la utilización de las herramientas de corte podría ser la siguiente: Taladrado 30%, Torneado 20%, Fresado 16%, Roscado 15%, Tallado 6% Escariado 5 %, Brochado 4%, Otras 4%. El taladrado y el roscado son operaciones de mecanizado que en muchos procesos son consideradas complementarias de otras más importantes por el tiempo de mecanizado invertido en comparación con el torneado y el fresado. Sin embargo, es conocido que el taladrado **produce más del 70% de la viruta generada en la industria del mecanizado**, por tanto cualquier mejora en el proceso tiene un **impacto medioambiental directo.**

En la actualidad la utilización de las máquinas herramienta exige un alto rendimiento de las herramientas de corte. Las operaciones de desbaste y acabado se combinan constantemente y las paradas de máquina deben reducirse al mínimo en busca de un mecanizado que conduzca la fabricación de la primera pieza con la calidad requerida en el menor tiempo posible, al mismo tiempo que se produce un cambio mínimo de las brocas. **En el caso del taladrado de alto rendimiento esto exige:**

- 1°.- Altos promedios de penetración.
- 2°.- Buena calidad de agujeros (buena rugosidad, tolerancias ajustadas y un centrado correcto).
- 3°.- Larga vida de la herramienta.

4º.- Excelente control (fuerza, par, potencia) y evacuación de la viruta.

I.3. Resultados obtenidos.

Los resultados de la investigación industrial han permitido sentar las bases para la implementación de una **tecnología convergente** aplicada a los procesos de fabricación, y específicamente al taladrado de alto rendimiento totalmente nueva en España. Centros tecnológicos (Fatronik) y universidades (la Universidad del País Vasco, La Universidad de Cádiz) han trabajado intensamente junto a empresas como AIRBUS España S.L. y Etxe-Tar en sistemas para optimizar el proceso de taladrado [54,55, 56].

A medio plazo, la implantación del método desarrollado permitirá consolidar una línea de I+D+i de entidad propia y que apunta hacia el taladrado de alto rendimiento que permitirá la fabricación de componentes que no es posible por los métodos actuales. Un ejemplo palpable es el taladrado profundo para antenas embarcadas en aviones y cuyo acabado es esencial por formar parte del circuito de enfriamiento de la antena. Muchos otros componentes especiales requieren no sólo de alta productividad sino también considerar el desgaste de la herramienta de corte. El motivo es que la rotura catastrófica debido a un desgaste excesivo de la broca puede significar considerables pérdidas económicas y retardos en los plazos de entrega, aspecto clave en la actualidad. En cualquier caso el sistema inteligente de monitorización en red será aplicado a componentes especiales con un amplio uso en la industria aeronáutica y aeroespacial.

Un objetivo ambicioso, que va más allá de este proyecto, es el desarrollo de un método de fabricación para componentes aeronáuticos especiales sustentado en la convergencia de las más avanzadas tecnologías mecánicas (mecanizado de alto rendimiento) e informáticas y de las comunicaciones. En ese marco se prevé diseñar un sistema inteligente de monitorización en red que será aplicado al proceso de taladrado de alto rendimiento. El sistema debe estar basado no sólo en tecnologías avanzadas de las comunicaciones (redes inalámbricas de sensores) y de la información (técnicas de Inteligencia Artificial, algoritmos computacionales, etc.), sino también debe considerar las estrategias de corte, monitorización y verificación de la calidad en el mecanizado de alto rendimiento.

-Para este fin se ha desarrollado la primera fase de actuación enmarcada en este proyecto:

1ª fase: Fase de investigación, desarrollo y aprendizaje. En esta fase se adquirirían los equipos necesarios y se realizarían pruebas afrontando el problema hasta el hito de alcanzar los requisitos requeridos.

I.3.1 Tecnologías más significativas desarrolladas en el proyecto.

Las tecnologías tratadas han sido **multidisciplinares** (mecánica-informática-automática) y han incluido **tecnologías convergentes** (sensores inalámbricos, informática, mecánica, técnicas de Inteligencia Artificial) que apuntan hacia el diseño de un sistema inteligente de monitorización en red. Como parte del desarrollo del proyecto se han utilizado de forma masiva otros procesos de mecanizado de alto rendimiento.

I.5. Actividades realizadas

Desde el punto de vista de la monitorización, el taladrado de alto rendimiento reúne todas las características de un sistema altamente complejo y no lineal, y por tanto, son necesarias nuevas estrategias de modelado capaces de hacer frente a la complejidad e incertidumbre en los procesos físicos que tienen lugar. Los reportes indican que se pueden obtener mejoras significativas en la eficiencia por medio de nuevos sistemas de monitorización y control. El coste de los sistemas de monitorización y control representa sólo una pequeña parte del capital (menos del 10%) y la incorporación de estos sistemas a empresas, ofrece una oportunidad de mejorar ostensiblemente la competitividad. Es conocido que los fallos en las herramientas de corte (rotura, desgaste) provocan hasta un 7% de las paradas productivas, además de un elevado número de piezas defectuosas. Se estima que la rotura de las herramientas de corte en el futuro será una de las averías principales en los próximos años, con un incremento de más de un 25%.

En la actualidad muy pocos fabricantes de componentes y en especial, las PYMEs para cuales el acceso a la tecnología disponible es muy limitado, han aceptado los sistemas de monitorización, existiendo sólo soluciones parciales para el taladrado convencional, mientras que **a alta velocidad las estrategias de monitorización y los sistemas de detección del estado de la herramienta de corte son prácticamente inexistentes**. Ante el cambio de las condiciones de corte, estos sistemas producen un elevado número de falsas alarmas lo que trae consigo en muchos casos su desconexión. De ahí que muchas de las soluciones aplicadas en el taladrado convencional, no pueden ser extendidas. Al pobre funcionamiento de los sistemas en operaciones a baja velocidad se unen en **taladrado de alto rendimiento las elevadas restricciones de tiempo de procesamiento y el poco conocimiento de los procesos físicos que tienen lugar**.

Ciertamente existe un esfuerzo grande en la comunidad científica dirigido hacia el desarrollo de los sistemas de monitorización del estado de la herramienta de corte. En general la implementación con éxito de estos sistemas depende de tres partes esenciales: la robustez del sistema sensorial, la calidad y cantidad de información de las señales medidas y las técnicas utilizadas para procesar la información y llevar a cabo la toma de decisiones. A grandes rasgos, se puede afirmar que los sensores de fuerza de corte disponibles (e.g., dinamómetros) tienen muchas limitaciones en cuanto al coste, instalación y sincronización con el CNC. Muchos proyectos a nivel europeo y mundial se centran en las señales de algunos de los ejes de la máquina, pero en general estas señales son muy ruidosas y es necesario un post-procesamiento muy costoso computacionalmente. Sin embargo en el campo de las redes de sensores inalámbricos los progresos han sido apreciables.

Estos grandes avances en el estudio y aplicación de los sensores, aún no son visibles en los resultados de las estrategias para mejorar el aprendizaje y la toma de decisiones, y asociar la información sensorial con el estado del proceso. Algunos reportes concluyen que sólo el 15% de los fallos se deben al sensor, mientras que el resto se deben a errores de operación y al uso de sistemas inadecuados. En el caso del taladrado convencional, los investigadores enfocan sus trabajos hacia la detección del desgaste y la optimización de las condiciones de corte del proceso. Incluso, muchos de los sistemas no han sido probados en ambientes productivos, son generalmente off-line y utilizan muchos sensores, lo cual hace muy difícil la actualización de las máquinas antiguas y la instalación en las máquinas actuales.

1.5.2 Estudio de los procesos de mecanizado de alto rendimiento.

En esta tarea se han estudiado las tecnologías de fabricación y los procesos de alto rendimiento divididos por zonas: América del Norte, Europa y Asia.

Los métodos modernos de producción y fabricación demandan de los sistemas de control un buen comportamiento en una amplia gama de condiciones de trabajo. Sin embargo, en tales circunstancias existe un gran número de procesos que exhiben fuertes no linealidades y un comportamiento no estacionario y, por tanto, existe una notable incertidumbre sobre el proceso en cuestión.

Todas estas circunstancias han motivado que en la actualidad la optimización de muchos procesos industriales, sea un problema sólo resuelto parcialmente. En la mejoría de la eficiencia del proceso productivo influye de manera significativa el hecho de que no se pueden alcanzar incrementos significativos de la productividad a partir de los esquemas de control clásicos instalados. Dos caminos interesantes para abordar la optimización son la introducción de niveles de supervisión y coordinación en los lazos de control instalados, y la posibilidad de añadir nuevos reguladores utilizando como variables controladas aquellas que influyen de manera decisiva en el proceso productivo.

Con vistas a materializar cualesquiera de estas vías de solución no excluyentes, desempeñan un papel relevante los sistemas inteligentes, que basan su funcionamiento en la utilización de la experiencia humana, de forma directa y/o de manera simulada. De todas las técnicas, el control borroso representa un punto de partida bien diferenciado del resto de los aportes. Básicamente, en lugar de utilizar modelos matemáticos para el diseño de los sistemas de control, se trata de aplicar la lógica borrosa para construir reguladores que incorporan el conocimiento de los operadores.

Aparentemente el pensamiento humano tiene la facilidad de reconocer patrones y hacer razonamiento global a varios niveles, para lo cual dispone de una jerarquía en el conocimiento con un encadenamiento lógico en cada nivel. Este debe ser uno de los motivos por el que la destreza de los operadores para controlar y supervisar los procesos complejos haya sido, y sea fundamental. Es por ello que gana importancia el control jerárquico en estrecho nexo con los sistemas inteligentes. Esto nos permite no sólo descomponer las tareas, sino también hace posible un nuevo enfoque de la optimización donde se aprovecha en cierta medida la habilidad del operador y no es necesario realizar grandes modificaciones a los esquemas de control existentes. Si analizamos con profundidad, las nuevas técnicas han propiciado el planteamiento y la solución de exigentes requisitos de funcionamiento, y la posibilidad de realizar algunas tareas de supervisión y control jerárquico que hace algunos años no eran posibles.

A partir de las bondades de esta arquitectura, se pueden implementar otras variantes, como el esquema jerárquico basado en uno o más niveles, mostrado en la figura 1. Básicamente, se trata de seleccionar una variable controlada representativa del proceso en cuestión (y).

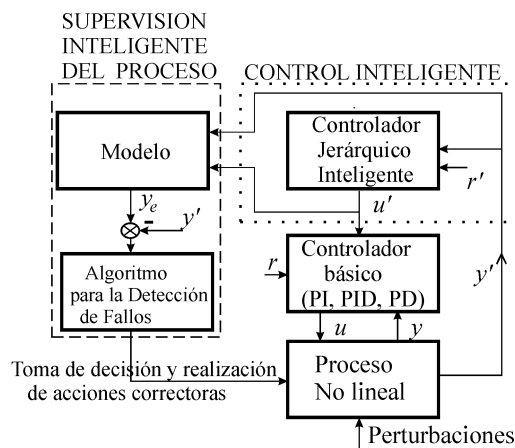


Figura 5. Esquema de control y supervisión inteligente.

La industria manufacturera continúa teniendo una importancia vital en las naciones industrializadas, tanto desde un punto de vista de pura competitividad económica como de interés político, por ejemplo, en temas de seguridad nacional. Es bien conocido, que dicha industria representa aproximadamente un tercio del valor de todos los bienes y servicios producidos en las naciones industrializadas.

El incremento de la competitividad global y la fuerte competencia internacional han motivado que la automatización de aquellos procesos manufactureros constituya una alta prioridad en todo el mundo. Una comisión del Consejo Nacional de Investigación de USA (NRC) ha establecido una serie de retos para la nueva generación de manufactura que aparecen en [1]. Las tecnologías de automatización continúan estando en el nivel más alto en la lista de tecnologías identificadas como críticas para la competitividad económica y la seguridad de las naciones.

Dentro de estos procesos de manufactura, los procesos de mecanizado constituyen la etapa esencial, ya que son los procesos más intensamente utilizados y los más críticos. La inversión del 10% en un controlador eficaz puede producir un incremento de productividad de cientos de veces el valor del controlador. Esta “amplificación” tan enorme de las inversiones hace que la automatización de los procesos de mecanizado sea una tarea tan crítica y rentable.

El paso clave en la automatización de los procesos de mecanizado se produjo en la década de los 50 cuando la empresa Parson, a través de un contrato con la Fuerza Aérea de USA, solicitó al Laboratorio de Servomecanismos del Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT) el desarrollo de una máquina-herramienta controlada numéricamente. Este controlador representó el estado del arte en los años 60. A partir de ahí, los computadores y la aparición de los primeros microprocesadores a comienzos de los años 70 supusieron nuevos avances al disponerse de computadores muy potentes, fiables y económicos.

Sin embargo, los procesos de mecanizado se caracterizan, ante todo, por su complejidad. La gran variedad de operaciones que abarcan y su complejidad, hacen extremadamente difícil la obtención de modelos del proceso basados en un buen entendimiento de los procesos físicos a controlar. La incertidumbre (vaguedad y ambigüedad) y el conocimiento incompleto, son características inherentes a los procesos de mecanizado.

La optimización de los procesos de mecanizado ha estado tradicionalmente soportada en unos programas pieza basados en datos pre-proceso no fiables. Pronto se comprendió que es imposible optimizar aquellos procesos, y mucho menos implantar funciones objetivo de las que hablaremos posteriormente, en base a la utilización de los programas pieza actuales. Los sistemas de ayuda a la programación se han demostrado claramente insuficientes si se pretende optimizar, de alguna forma, los procesos de mecanizado. Por ello, desde hace ya muchos años, se pretendió la optimización, en mayor o menor medida, de aquellos procesos.

El primer intento serio de optimización se produjo, ya en la década de los 60, a través de un contrato de la Fuerza Aérea de USA con la empresa Bendix. El sistema diseñado incluía una optimización on-line y un control adaptativo muy avanzados. El sistema recibió el nombre de control adaptativo con optimización (ACO). Este sistema, sin embargo, en la práctica industrial no llegó a funcionar nunca, dado que su funcionamiento estaba basado en la existencia de sensores, por ejemplo, de medida del estado de la herramienta, que en los años 60 no estaban disponibles. Aún hoy día, siguen sin estar disponibles como ya veremos en otro apartado de este artículo.

Las dificultades evidentes para la automatización de los procesos de mecanizado se han incrementado, si cabe, con la aparición reciente de dos nuevos paradigmas del mecanizado: la incorporación de funciones objetivo y variables de mérito y el mecanizado de alto rendimiento. En la actualidad, ya no se demanda únicamente una mejora en la productividad, sino que también se exige precisión dimensional y calidad superficial de las piezas, todo ello con los costes más

reducidos posibles. Se podría decir que el nuevo paradigma del mecanizado sería ahora: maximizar la tasa de arranque de viruta, minimizando la tasa de desgaste de la herramienta y manteniendo la calidad, tanto dimensional como superficial, de TODAS las piezas mecanizadas dentro de unas especificaciones dadas.

El mecanizado de alto rendimiento impone nuevos conceptos y estrategias de diseño mecánico de los elementos de la máquina, así como el rediseño drástico de todos los esquemas relacionados con los sistemas de monitorización, control y supervisión de los procesos. Una gran parte de los conceptos aplicados hasta el momento dejan de ser válidos cuando se trata de controlar y supervisar máquinas capaces de moverse, con gran precisión, a velocidades del orden de decenas de miles de milímetros por minuto, y con elevadísimas velocidades de giro en su husillo principal (30.000 – 60.000 rpm). La complejidad de los procesos, no-lineales, no-estacionarios y de naturaleza multivariable, se hace aún más patente en el taladrado de alto rendimiento.

En la actualidad, muy pocos fabricantes, y sobre todo, muy pocos usuarios finales de máquinas-herramienta convencionales, han aceptado sistemas de monitorización, control y supervisión, existiendo soluciones muy particulares. Al pobre desempeño de estos sistemas en operaciones a baja velocidad se unen en alta velocidad las elevadas restricciones en los tiempos de procesamiento y el escaso conocimiento de los propios procesos físicos que tienen lugar.

Para enfrentarse a todos estos desafíos, los antiguos y estos recientes, se impone la adopción de nuevas arquitecturas de control y supervisión multinivel y en red. Los esquemas de control jerárquico multinivel, apoyados por potentes sistemas sensoriales de mecanizado, constituyen un camino viable de cara a la resolución de los problemas presentados. Un sistema jerárquico de control hará el proceso más previsible en los niveles inferiores de control, y por tanto, reducirá la complejidad del esquema de control requerido. Parece evidente que deberán existir, al menos, dos niveles de control: el nivel máquina (el nivel actual) y el nivel proceso. Sin embargo, parece más conveniente distinguir, al menos, tres: nivel máquina, nivel proceso y nivel supervisor.

El nivel máquina tiene como objetivo optimizar el comportamiento dinámico de la máquina-herramienta. Con el nivel proceso se pretende incrementar la productividad, extremando parámetros tecnológicos sujeto a restricciones (espacio de trabajo permisible). El nivel supervisor tiene como objetivo dirigir el proceso de forma óptima de acuerdo con la función objetivo establecida. Evidentemente, éste no es el único esquema de sistema jerárquico de control posible. Se podrían crear más niveles, o incluso menos, fundiendo los niveles de control y supervisión en uno único.

Este esquema jerárquico deberá incluir un potente sistema de monitorización. Este sistema debería ser capaz de monitorizar el proceso de mecanizado, el estado de la máquina-herramienta y el estado de la herramienta de corte, que aún siendo parte del proceso, se trata aparte por sus peculiaridades y enorme importancia.

Este esquema propuesto funcionaría en proceso (on-line). Sería necesario incorporar a nuestro esquema una potente unidad de ayuda a la programación dotada de simuladores, tanto geométricos como del proceso. Esta unidad funcionaría fuera de proceso (pre-proceso) y sería la encargada de suministrar a cada módulo de mecanizado los correspondientes programas pieza, lo más optimizados posibles, así como las estrategias de mecanizado (funciones de mérito) planificadas para las distintas fases del proceso de mecanizado de cada pieza (desbaste, semiacabado, acabado, entre otros).

De acuerdo con todo lo anterior, un posible esquema de sistema de control de los procesos de mecanizado de alto rendimiento aparece en la figura 6. En ella se pueden observar los tres niveles de control antes definidos (horizontales) y los dos niveles pre-proceso (off-line) y en-proceso (on-line) (verticales). Pasaremos ahora a describir brevemente los objetivos de cada unidad del sistema, logros de investigación recientes y las futuras direcciones de investigación.

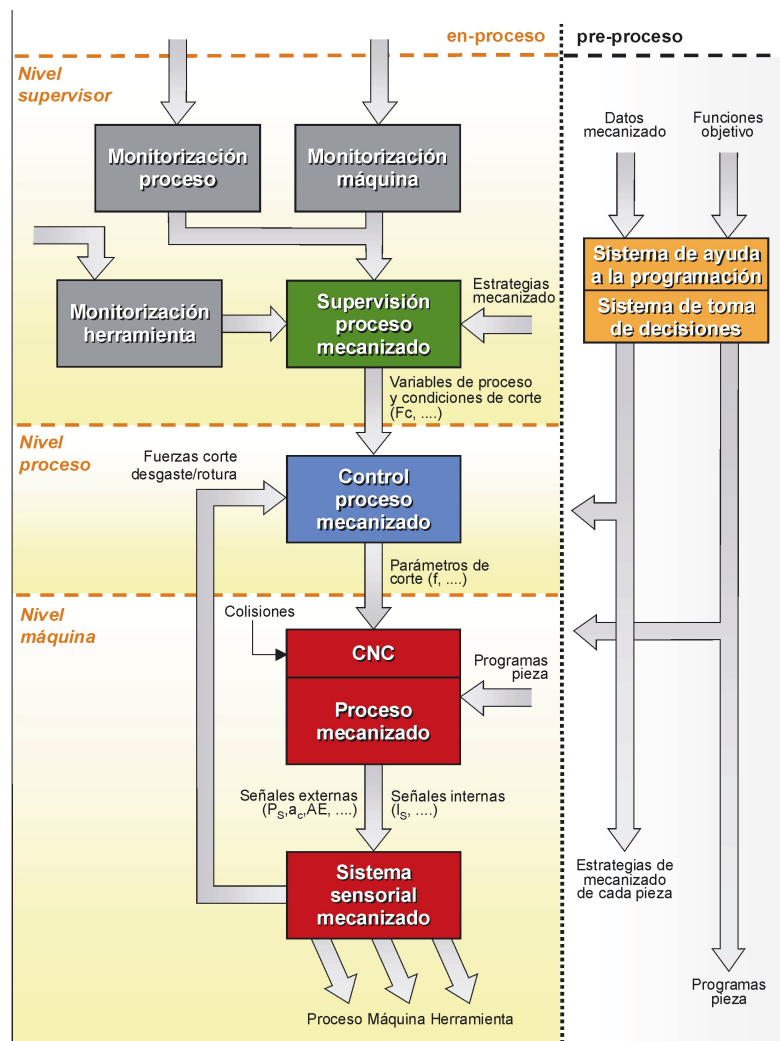


Figura 6. Sistema jerárquico para la monitorización y el control de los procesos de taladrado de alto rendimiento.

Con el nivel de control máquina se pretende optimizar el comportamiento dinámico de la máquina-herramienta. Es el nivel representado por los nuevos CNC de arquitectura abierta. Con este control máquina se trata básicamente de gobernar los movimientos punto a punto y las operaciones de contorno. En estas operaciones punto a punto, la trayectoria entre puntos no se controla. No obstante, las precisiones del posicionamiento actuales ($1-5 \mu\text{m}$), las velocidades de posicionamiento y las interacciones entre la máquina-herramienta y el proceso hacen que esta tarea no sea tan sencilla como pareciera. Los errores geométricos de la máquina-herramienta afectan la precisión del posicionamiento debido a las irregularidades en los componentes de la estructura de la máquina, los efectos térmicos en la máquina y los efectos debidos a las fuerzas de corte. Las irregularidades en los componentes de la máquina se pueden compensar off-line (interferometría láser y otras). Sin embargo, los efectos de la temperatura y de las fuerzas de corte sólo pueden ser compensados on-line. En la década de los 90 se ha investigado intensamente en estas temáticas, habiéndose conseguido resultados muy esperanzadores [2]. El problema principal continúa, no obstante, sin resolverse plenamente ya que se necesitan buenos modelos que relacionen la temperatura o fuerzas de corte con los errores geométricos en cada uno de los ejes de la máquina-herramienta. Se ha avanzado mucho en la compensación off-line, pero queda aún mucho por hacer en la compensación on-line basada en la medida o modelado de las variables características.

Las operaciones de contorneado son la esencia de este nivel máquina. La tarea es doble, por un lado, la generación de trayectorias y, por otro, el seguimiento preciso de tales trayectorias en un dominio espacial, que no temporal. La generación de las trayectorias se realiza en la práctica con unos dispositivos especiales, normalmente software, denominados interpoladores. Su objetivo es generar las referencias de posición, para cada eje de la máquina, de acuerdo con la geometría deseada. Esta geometría puede ser sencilla, es decir, segmentos y arcos circulares pero, en general, se deberán describir geometrías más complejas, tipo parábolas o cúbicas, geometría esta última muy utilizada a la hora de describir curvas o superficies no analíticas. En la actualidad, los sistemas CAM (fabricación con ayuda de computador), en general, realizan la segmentación de la geometría produciendo pequeños segmentos lineales que son enviados al CNC como referencias de posición. El procesamiento de estas referencias de posición por parte de los CNC, presenta diversos inconvenientes: errores de transmisión debidos a la multitud de datos a transmitir sujetos al ruido o pérdida de datos, discontinuidades en la segmentación, lo que deteriora la precisión de la superficie, y discontinuidad en las velocidades debido a la linealización de la curva en cada segmento, en especial en las fases de aceleración y deceleración. Por estas razones, los nuevos CNC tienen incorporadas funciones que permiten la generación de curvas paramétricas arbitrarias.

La generación de curvas paramétricas es una solución muy conveniente para el control de máquinas-herramienta multieje. Por ejemplo, en el caso de una curva tridimensional, se puede describir de forma paramétrica cualquier curva mediante funciones del tipo: $x=x(u)$, $y=y(u)$, y $z=z(u)$, donde u es un parámetro arbitrario en el rango $[-1, 1]$. Actualmente se está desarrollando una investigación muy importante en interpoladores paramétricos usando *splines* de Bezier o *Non-Uniform Rational B-Spline*, los conocidos interpoladores NURBS. Manipulando los pesos, los vectores de los nudos y los puntos de control usando NURBS es posible generar un número muy elevado de formas, en particular, las típicas funciones cúbicas.

Los interpoladores NURBS actuales están basados en la generación de curvas a velocidad constante, excepto en las fases de aceleración y deceleración. En este caso, debido a las diferencias de curvatura, las fuerzas de corte varían. La TAM (Tasa de Arranque de Material) es más alta en las regiones cóncavas y más baja en las regiones convexas.

Los primeros algoritmos desarrollados mantenían la longitud de cuerda constante. La herramienta se mueve la misma distancia en cada periodo de muestreo: $v = \Delta s/T_s$, donde Δs y T_s son constantes. Por ello, en regiones de curvatura muy reducida se producían errores cordales que pueden llegar a ser elevados, sobre todo, en operaciones de alto rendimiento [3]. Para resolver este problema se desarrollaron algoritmos con velocidad de avance adaptativa que aseguran un error cordal máximo (tolerancia), durante todo el proceso de interpolación. El algoritmo debe identificar, en cada instante, la relación entre el error cordal, la velocidad y el radio de curvatura [3].

Sin embargo, los efectos de la curvatura producen una variación en la TAM. Por ello, se hace necesario que el algoritmo tenga en cuenta la curvatura en cada instante y que sea capaz de modificar la velocidad de avance continuamente, de acuerdo con aquella [3]. Ello sería muy útil para proteger a la herramienta y a la máquina contra valores excesivos de las fuerzas de corte. Por ello, las últimas investigaciones en este campo se dirigen al diseño de interpoladores NURBS híbridos, es decir, que además de controlar y mantener acotado el error cordal, aseguran una tasa de arranque de viruta constante, de acuerdo con las restricciones propias de la máquina y la herramienta. Estos nuevos algoritmos NURBS están empezando ahora a aparecer en todos los CNC abiertos modernos, teniendo una gran aceptación, sobre todo, en los sistemas actuales en los que el nivel proceso no ha sido implementado todavía. En los controles CNC del futuro, el controlador nivel proceso sería el encargado de mantener una TAM constante según las restricciones propias de cada conjunto mecánico.

El interpolador, como ya se ha comentado, es el encargado de generar las referencias de posición para todos los ejes de la máquina. El controlador es el encargado de gobernar los ejes de la máquina, de forma tal, que los errores de perfil en contorno sean nulos. Estos errores de perfil dependen de los errores axiales, pero el objetivo último aquí no es reducir los errores axiales E_x y E_y independientemente, sino reducir el error de contorno. Aquí, el problema es doble. Por un lado, hay que reducir drásticamente los llamados errores de seguimiento para cada eje. Por el otro, hay que eliminar el error de contorno.

Para reducir los errores de seguimiento axiales, ya desde hace años, los controles CNC modernos utilizan técnicas de control anticipativo (feedforward) y control predictivo. El concepto de control anticipativo está basado en la cancelación de polos/ceros. Esto no es fácil de hacer en la práctica. Tomizuka [4] ha desarrollado diferentes algoritmos de control basados en error de fase cero (*Zero Phase Error Tracking Controller* – ZPETC) que pueden ser implementados en presencia de polos inestables.

La eliminación del error de contorno, en la actualidad, está siendo objeto de numerosos trabajos de investigación aunque estos desarrollos no han llegado aún a la práctica industrial. Se están investigando numerosos algoritmos basados en el llamado Control de Acoplamiento Cruzado (CCC) [5].

Todos estos algoritmos, presentados por primera vez por Koren [6], parten de un modelo de error de contorno instantáneo y su utilización en una ley de control que genera una señal de compensación, en cada servomecanismo de control de posición de los ejes, con el objetivo de eliminar el error de contorno. Estos algoritmos están aún en fase de investigación, aunque ya han demostrado su validez a nivel laboratorio reduciendo los errores de contorno en relaciones 5:1.

Estos algoritmos y otros semejantes siguen hoy siendo objeto de intensa investigación ya que, como hemos comentado, la reducción de los errores axiales no asegura necesariamente la eliminación de los errores de perfil en contorno que es, a la postre, lo que realmente interesa para obtener piezas de elevada precisión dimensional. Además, como se ha podido demostrar la velocidad de avance tiene una fuerte repercusión sobre los errores de perfil con lo que el mecanizado de alto rendimiento es especialmente propenso a la obtención de errores de perfil en contorno elevados. Si no se dispone de algoritmos de control adecuados, la única solución consistiría en disminuir la velocidad de avance, con el consiguiente deterioro en la tasa de arranque de viruta, reduciendo de forma notable la productividad de las máquinas-herramienta de alto rendimiento.

Acabada esta breve presentación de la situación de la investigación a nivel máquina pasamos ahora a describir el nivel proceso. Su objetivo, como se ha comentado, es incrementar la productividad, extremando parámetros tecnológicos, en particular las velocidades de avance y de corte, sujeto a las restricciones propias de la máquina.

En este nivel proceso, actualmente la investigación se dirige al control de variables que afectan directamente la productividad de la máquina, en particular, las fuerzas de corte. El diseño de sistemas de control de las fuerzas de corte no es una tarea sencilla debido a las variaciones del proceso, siempre de ganancia variable, que producen una degradación de sus prestaciones e incluso problemas de estabilidad. Controladores con ganancia fija no pueden ser implementados y hay que, por tanto, utilizar necesariamente técnicas de control adaptativo. Desde hace años, se utilizan diferentes técnicas de control adaptativo como los métodos de ganancia variable con estimación explícita de parámetros. Hoy, sin abandonar estas técnicas, la gran mayoría de la investigación se dirige a la utilización de modelos de referencia y técnicas de control robusto. Estas estrategias incorporan, en todos los casos, un modelo de fuerzas de corte que, una vez calculado, se utiliza en el diseño de controlador adaptativo.

En la literatura científica aparecen diferentes modelos de referencia, además de los clásicos de ganancia variable con un estimador explícito de parámetros. Los controladores que utilizan modelo de referencia se pueden clasificar en cuatro tipos: controlador por linealización, por transformación logarítmica, controlador no lineal y controlador robusto. En [7] se hace un estudio completo de todos ellos analizando, vía simulación y de forma experimental, la respuesta transitoria y la robustez de dichos sistemas.

El controlador por linealización utiliza técnicas de linealización para convertir la ecuación no lineal en lineal. Para ello, parten de la representación habitual de F (fuerza de mecanizado):

$$F = kd^{\beta} v^{\gamma} f^{\alpha} \quad (1)$$

Siendo k la ganancia del proceso, d la profundidad de pasada, v la velocidad de corte, f la velocidad de avance y α , β , y γ coeficientes que describen las relaciones no lineales entre F y los parámetros de corte (f, d y v). Típicamente, la variable de control es la velocidad de avance, y por tanto, la ganancia del proceso es: $\Theta = kd^{\beta} v^{\gamma}$, que, como puede observarse, es variable dependiendo de v y d. Las técnicas de linealización utilizadas aparecen en [7] donde se muestran los resultados de aquella.

Algunos trabajos presentan resultados que utilizan ganancia fija en los controladores. Otros, en cambio, tienen en cuenta la profundidad de pasada o las no linealidades existentes entre fuerza-avance y fuerza-profundidad. En estos casos, las ganancias del controlador se ajustan teniendo en cuenta aquellas no-linealidades.

El controlador por transformación logarítmica transforma la ecuación no lineal en lineal de la forma:

$$\ln(F) = \ln(k) + \beta \ln(d) + \gamma \ln(v) + \alpha \ln(f) \quad (2)$$

donde los tres primeros sumandos se consideran como perturbaciones aditivas del proceso. Para más información ver [7].

El control adaptativo robusto ha sido también objeto de intensa investigación. Algunos investigadores [8] utilizaron un controlador Gaussiano Cuadrático Lineal (LQG) que garantiza propiedades de robustez en los sistemas SISO (entrada única – salida única). Otros [9] diseñaron un controlador robusto en el dominio continuo usando la Teoría de la Realimentación Cuantitativa (QFT). Posteriormente, se diseñaron otros controladores en el dominio discreto utilizando la transformada delta [10]. Rober [11] perfeccionó estos diseños e implementó el controlador *on-line*. Se siguen desarrollando, en la actualidad, intensas investigaciones sobre estos esquemas de control adaptativo con modelo de referencia. Además, se continúa investigando en los de ganancia variable con estimación explícita de parámetros. Esta estimación de parámetros tiene el inconveniente de la estimación on-line de parámetros múltiples.

Aunque estas estrategias de control adaptativo no están aún plenamente integradas en los procesos de control, al menos, a nivel laboratorio parecen mostrar ciertas direcciones de utilización en ambiente industrial.

En ambientes de producción de piezas únicas, lo que hoy es ya bastante habitual, las herramientas, piezas y fluidos de corte cambian continuamente por lo que aplicar modelos de

referencia no es económicamente viable. Por ello, la mejor solución pueden ser los controladores de ganancia variable con estimación explícita de parámetros.

En ambientes de producción en masa, donde las características operativas son constantes, el controlador por transformada logarítmica podría ser una buena solución, ya que es el más insensible a las variaciones de los parámetros y a las incertidumbres del modelo.

Para la producción por lotes, que trabajan con un rango específico de características operativas, el controlador robusto presenta los mejores resultados, ya que garantiza unas prestaciones sobre un rango especificado de condiciones de operación. La robustez de estos controladores es una característica muy valorada en estos procesos de producción.

No podemos dejar pasar la oportunidad de presentar aquí las actuales aportaciones sobre controladores basados en técnicas de Inteligencia Artificial (lógica borrosa, redes neuronales y algoritmos genéticos) [12, 13]. En la actualidad, las Redes Neuronales Artificiales (RNA) y la lógica borrosa (LB) son probablemente las técnicas de Inteligencia Artificial (IA) más ampliamente utilizadas en la identificación (obtención de modelos) y el diseño de sistemas de control. Las RNA han demostrado una excelente capacidad para representar cualquier función no lineal con el grado de precisión deseado (aproximador universal). Debido a esto, las RNA son muy adecuadas para la identificación y control de sistemas no lineales. De entre ellas, las redes anticipativas (*feedforward*) y, en particular, el perceptrón multicapa son las más frecuentemente utilizadas en el control no lineal. Además, a través de la LB podemos incorporar a los sistemas de control conocimiento humano expresado en términos cualitativos.

Como ya hemos comentado, el nuevo paradigma del mecanizado consiste en maximizar la tasa de arranque de material (TAM), minimizando al mismo tiempo la tasa de desgaste de la herramienta y manteniendo la calidad superficial y dimensional de todas las piezas dentro de unas especificaciones pre-establecidas.

Para alcanzar este objetivo global es evidente que el sistema sensorial de mecanizado es una unidad clave a la hora de identificar los comportamientos de la máquina, herramienta y proceso. Estos sensores, unidos a las unidades de procesamiento posterior, constituyen lo que en la figura [1] hemos identificado como unidades de monitorización de la máquina, herramienta y proceso.

Las técnicas de sensorización en general pueden clasificarse en directas e indirectas. En las directas, el atributo se obtiene directamente de las señales y en las indirectas a través de modelos. Un ejemplo de técnica directa de medida del desgaste de la herramienta sería la visión artificial, siendo una posible técnica indirecta la emisión acústica. Los sensores también se pueden clasificar: en proceso y fuera de proceso. Un sensor en proceso monitoriza durante el propio proceso de mecanizado, mientras que un sensor fuera de proceso, normalmente actúa post-proceso, usualmente entre el mecanizado de dos piezas.

Pasaremos ahora a describir los sistemas sensoriales más utilizados en los procesos de mecanizado convencional, alguno de los cuales empieza a aplicarse en los procesos de mecanizado de alto rendimiento (ver figura 7).

Acelerómetros, sensores de emisión acústica,
dinámometros en el cabezal, la bancada y la mordaza

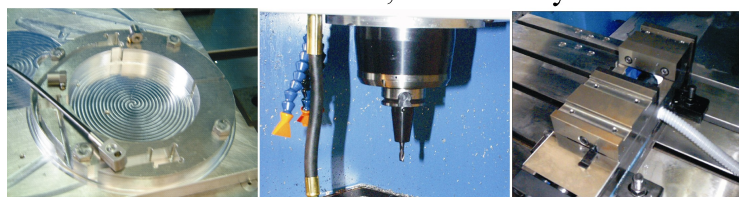


Figura 7. Algunos sensores en el mecanizado de alto rendimiento

La monitorización del estado de la máquina aparece como una tarea de mantenimiento, independiente del propio mecanizado, que habilita la máquina para comenzar o continuar con el mecanizado. En este caso, la monitorización tendrá en cuenta conceptos tales como el estado de los rodamientos y engranajes, la aparición de vibraciones en los elementos móviles – en especial, en vacío –, la adecuación de la temperatura de los componentes o el consumo de los accionamientos, entre otros. Mucha investigación se ha desarrollado hasta hoy para monitorizar el estado de los principales componentes mecánicos de las máquinas. Sin embargo, en la práctica industrial sus aplicaciones son aún mínimas, aplicándose sensores muy sencillos basados, por lo general, en el uso de un límite superior o inferior de un valor constante a lo largo de todo el mecanizado.

La monitorización del proceso de mecanizado tiene por objeto la detección de perturbaciones o modos de funcionamiento que tengan un efecto negativo en el proceso de mecanizado y, sobre todo, en el resultado del mismo, dejando a un lado el estado de la herramienta que, aún siendo proceso, merece por su complejidad un desarrollo aparte. Pueden englobarse dentro de la monitorización del proceso de mecanizado todos aquellos fenómenos que tengan incidencia en la medida de la calidad superficial de la pieza mecanizada (e.g., vibraciones), aquellos que proceden de errores de planificación del mecanizado (e.g., precisión dimensional) o de condiciones de mecanizado inesperadas (e.g., colisiones entre partes de la máquina).

Iniciaremos, por sus peculiaridades, con los sensores del estado de la herramienta. Desde hace ya muchos años se ha dedicado una enorme cantidad de investigación al área de monitorización de la herramienta por el hecho de que el fallo de herramienta representa alrededor del 20% de todas las paradas de máquina y que el desgaste de herramienta impacta claramente en la calidad de las piezas, en su precisión dimensional, acabado superficial e integridad superficial.

Las técnicas de visión artificial han tenido mucho éxito, en el ámbito de laboratorio, produciendo resultados muy precisos. Sin embargo, sólo ha funcionado en los laboratorios y siempre post-proceso, es decir, cuando la herramienta no está ya en contacto con la pieza. La iluminación ha resultado ser un aspecto sumamente crítico.

La mayoría de los desarrollos llevados a cabo en los laboratorios están limitados a medidas 2D. Pocos resultados se han producido en 3D y sólo para desgaste del cráter.

Las fuerzas que aparecen durante el mecanizado también vienen afectadas por el desgaste de la herramienta. La componente de la fuerza radial parece ser la más sensible al desgaste de la herramienta. A veces se utilizan relaciones entre fuerzas, así la relación fuerza en el avance/fuerza de corte parece ser muy sensible al desgaste del flanco de la herramienta.

Durante el proceso de corte, la pieza experimenta una deformación plástica considerable, lo que genera señales acústicas (emisión acústica). Estas señales acústicas de alta frecuencia (50kHz a 1MHz) son muy sensibles al desgaste de la herramienta. Existe una demostrada fuerte correlación entre el valor RMS de la emisión acústica y el desgaste de la herramienta. La varianza resulta uno de los parámetros más sensible, mostrando la mayor amplitud al final de la vida de la herramienta.

Estos resultados de laboratorio tampoco se han llevado aún a la práctica industrial por no conocerse adecuadamente el significado físico de las señales de emisión acústica y por la gran sensibilidad de éstas a la situación (localización) del sensor. A todo lo anterior, convendría añadir que, en los procesos de mecanizado de alto rendimiento, el desgaste de herramienta se produce muy lentamente si aquel proceso ha sido bien programado y que, sólo al final de la vida de la herramienta se produce un abrupto deterioro de ésta y su rápida rotura. Por tanto, técnicas como las basadas en las fuerzas de corte tienen una difícil aplicación en el mecanizado de alto rendimiento.

Hasta la fecha, la práctica totalidad de los sistemas de monitorización del estado de la herramienta basan su funcionamiento en estrategias muy sencillas con la detección de la violación

de un límite prefijado. Estas estrategias necesitan habitualmente ser reparametrizadas debido a la gran variabilidad de las condiciones en que puede realizarse el mecanizado. Añadir una mayor inteligencia al proceso de monitorización y una cierta capacidad de adaptación al proceso productivo, manteniendo su sencillez de manejo de cara al usuario final es tema de investigación, a día de hoy, de numerosos grupos de investigación en el ámbito mundial.

Finalmente queremos hacer constar que, aunque la estimación del desgaste de la herramienta, y en particular su rotura, funciona suficientemente bien de cara a una estrategia de cambio por rotura de herramienta, sin embargo, no suministra resultados suficientemente precisos para una vieja reivindicación de los usuarios, es decir, la compensación geométrica automática debida a los errores que provoca el desgaste de la herramienta. Las herramientas desgastadas producen una falta evidente de precisión dimensional de las piezas mecanizadas como consecuencia de una compensación errónea del radio de la herramienta de corte.

La monitorización del proceso de mecanizado ha suscitado en los últimos años un volumen enorme de proyectos de investigación con resultados muy dispares. Se pueden monitorizar muy diversos aspectos relacionados con el proceso de mecanizado pero nosotros, en este artículo por su repercusión en el mecanizado de alto rendimiento, nos vamos a referir únicamente a la detección de *chatter* regenerativo, la predicción de la textura superficial y la predicción de la precisión dimensional. Éstas son tres líneas muy fecundas de investigación que, hoy día, constituyen una fuente de información esencial si se pretende hacer realidad el paradigma del mecanizado al que ya nos hemos referido.

Los problemas dinámicos constituyen una clara limitación de las prestaciones que pueden alcanzar las máquinas-herramienta. Son varias las causas que pueden dar lugar a problemas de vibraciones, entre ellas, las habituales en cualquier tipo de máquina: desequilibrios de elementos rotativos, fuerzas variables en engranajes, defectos en cojinetes, etc. Sin embargo, en máquinas-herramienta surge un problema que es característico de las mismas y que, en general es la fuente principal de los problemas dinámicos en este tipo de máquinas. Se trata del problema de retemblado (*chatter*) asociado a un problema de estabilidad dinámica que se produce en estas máquinas en condiciones concretas de geometría, velocidad de corte y profundidad de pasada.

Las fuerzas que se generan cuando la herramienta de corte y la pieza entran en contacto provocan desviaciones dinámicas significativas de la estructura de la herramienta, incluyendo su cono y husillo, y de la estructura de la pieza, incluyendo sus utillajes. Para ciertas condiciones de corte estas interacciones llegan a ser inestables y las desviaciones aumentan hasta que la pieza y herramienta pierden contacto. Estas interacciones inestables son el conocido retemblado que provoca un incremento muy importante en las fuerzas del mecanizado, desgaste anómalo o incluso rotura de la herramienta y siempre piezas de desecho por la rugosidad superficial obtenida, fuera de toda especificación industrial. Tradicionalmente, el *chatter* era detectado por el operario por el ruido característico producido y por las marcas evidentes que aparecían en las piezas. Sin embargo, el operario no es la mejor solución para detectar el *chatter*, ya que el operario reacciona con lentitud y además, su corrección y supresión resulta casi imposible.

Hoy se ha investigado mucho en la detección automática del *chatter*, casi siempre analizando la densidad espectral de alguna señal característica del proceso y utilizando un valor de umbral que indica la aparición del *chatter*. Delio [17] y Altintas [18] utilizaron la presión sonora como señal de proceso mientras que Tarng y Li [19] usaron las de fuerza y par.

Todos estos algoritmos de umbral requieren que éste sea preseleccionado empíricamente y, en general, será siempre un valor fijo. Por ello, se tiende a utilizar otros algoritmos como el propuesto por Bailey [20]. Aquí se usa un acelerómetro montado sobre la estructura de la máquina y se calcula la llamada tasa de varianzas $R=(G_s/G_n)^2$ siendo G_s y G_n las varianzas de la señal del acelerómetro

en baja y alta frecuencia, respectivamente. Un valor de $R \ll 1$ indica la presencia de *chatter* regenerativo.

Todo lo realizado en investigación actualmente, relacionado con los niveles proceso y supervisión, no sería aplicable si los sistemas CNC actuales no fueran flexibles, tanto en software como en hardware. El concepto de control de arquitectura abierta ha venido propiciado por estas demandas de flexibilidad. Existen en la actualidad varios consorcios encaminados a tales fines: OMAC (USA), OSACA (EUROPA) y JOP (JAPÓN). Las definiciones de interoperatividad, portabilidad, escalabilidad e ínter cambiabilidad, han sido precisadas en SOSAS (Especificación de una arquitectura abierta). Sin estas especificaciones, los sistemas comerciales actuales no se pueden potenciar, ya que no es posible incorporar en ellos nuevas tecnologías según vayan produciéndose y validándose en los laboratorios de investigación.

El impacto de los resultados de investigación, aunque bien demostrados en el laboratorio, está aún siendo muy modesto en aplicaciones reales de taller. Una de las claves para que esta situación cambie es el desarrollo de estos sistemas de arquitectura abierta que facilitarían la integración de las nuevas tecnologías desarrolladas en productos comerciales existentes sin grandes costes adicionales. Con tales sistemas se podría alcanzar, al menos en una primera aproximación, el nuevo paradigma de los procesos de mecanizado, asegurándose la calidad del producto, flexibilidad del sistema y altas tasas de producción a costes razonables. Aunque ya existen arquitecturas abiertas comerciales, los temas relacionados con la responsabilidad y la estandarización permanecen aún sin resolver, lo que impide que estas nuevas aplicaciones puedan desarrollarse con normalidad en el ambiente industrial.

Aunque el objetivo esencial de esta tarea es analizar la situación actual, estado del arte, de los sistemas de automatización en proceso de los procesos de mecanizado de alto rendimiento, no quisiéramos finalizar aquella sin comentar algunas temáticas importantes relacionadas con el sistema de ayuda a la programación. Este sistema, funciona pre proceso, es decir, durante la elaboración de los programas pieza en las oficinas de programación de las empresas. Como sistema pre-proceso qué es, funciona con los datos y conocimientos previos que poseen los programadores a la hora de desarrollar los programas pieza para las distintas máquinas que componen el taller o talleres de esa empresa.

Estos sistemas de ayuda a la programación forman parte de la unidad CAM (fabricación con ayuda de computador) de cada oficina técnica. Estas unidades CAM están a su vez conectadas con el sistema CAD que es donde se utiliza el computador para el diseño de las piezas (diseño con ayuda de computador). Estas unidades CAD actuales son ya mucho más que simples sistemas automáticos de dibujo.

Estos sistemas de ayuda a la programación deberían disponer de herramientas potentes de simulación que permitan simular el proceso de mecanizado de la pieza. Por ello, los simuladores no deben ser exclusivamente de índole geométrico, sino que además deberían existir simuladores del propio proceso de corte. Esto es lo más complicado y pocos sistemas de programación actuales disponen de paquetes de simulación del proceso, por ejemplo, los valores predictivos de las fuerzas de corte que se producirían durante el mecanizado de esa pieza en la máquina-herramienta. Estos simuladores de proceso permitirían la generación de programas pieza mucho más optimizados en donde ya se tendrían en cuenta las funciones requeridas para cada subproceso de mecanizado en particular. Por ejemplo, podrían ya incorporar los diagramas de lóbulos de estabilidad para la determinación de unas condiciones de corte libres del *chatter* regenerativo. Podrían incorporar también las características dinámicas de cada máquina-herramienta, y muy en particular, las características de vibración del husillo principal de cada máquina-herramienta.

Finalmente quisiéramos recordar que una unidad de ayuda a la programación se podría utilizar para diversos módulos de mecanizado distribuidos geográficamente, ya sea en Redes de Área Local

(LAN), ya en áreas extendidas WAN incluyendo la posibilidad de utilizar la propia Internet para la distribución de programas pieza en ámbitos geográficos extendidos.

1.5.3 Estudio de los sistemas de monitorización y supervisión en red del proceso taladrado de alto rendimiento.

Se han estudiado los sistemas de monitorización del proceso de corte disponibles comercialmente. Además se han analizado las técnicas más modernas basadas en técnicas de Inteligencia Artificial para la monitorización y supervisión del proceso de corte y su aplicación a nivel de laboratorio.

La tabla 1 resume algunos de los métodos utilizados en la monitorización del proceso de taladrado de alto rendimiento. Aunque la literatura técnica es extensa se recogen sólo algunos trabajos. Como ya se mencionó anteriormente, una manera de compensar la influencia de la profundidad de corte en la vida útil de la broca y mejorar de la productividad es la introducción del control en tiempo real de la fuerza de corte/par de corte [46]. Este aspecto, que no ha sido tratado, tiene un alto riesgo ya que una gran parte de los sensores son inadecuados en las aplicaciones industriales (invasivos al proceso) y/o los CNC son cerrados y no admiten la modificación en tiempo real de las velocidades de giro/avance. La investigación en el control del proceso de taladrado de alto rendimiento se ha intensificado en los últimos años. Furness et al. [47], en un trabajo básico proponen, el control en tiempo real del proceso de taladrado por asignación de polos. Oh, Kim y Chu [48] utilizar un controlador PID diseñado por medio de la Ziegler-Nichols en procedimiento de ajuste. El controlador se ajusta posteriormente utilizando el método del lugar de las raíces, con el fin de eliminar el rebasamiento o sobrepaso en la respuesta muy dañino para la vida útil de la herramienta. Normalmente, rebasamiento provocar inestabilidad. Un documento similar de los mismos autores verifica el comportamiento de dicho sistema en función del desgaste de la herramienta [49].

Ciertamente, la complejidad intrínseca del proceso de taladrado (la dinámica del proceso de perforación no se conoce del todo), el diseño y la aplicación de un sistema de control inteligente y en red **plantea retos técnicos** relacionados con el inevitable retardo en la red, pero al mismo tiempo pudiera aportar muchas ventajas como la flexibilidad, el reducido tiempo de mantenimiento, y la reducción de costes. La utilización de las técnicas de Inteligencia artificial en el control ha suscitado considerable interés por parte de la industria en lo referido a la implementación e integración de sistemas en red. La principal ventaja de estas técnicas es que no requieren modelos precisos ni del proceso de taladrado de alto rendimiento ni de los retardos de la red para el diseño del sistema [52-53].

Tabla 1
Resumen de los métodos de monitorización de las brocas en el taladrado

Número de referencia	Par deriva	Fuerza avance	Vibración	Sonido	Ultrasonido	Emisión acústica	Corriente husillo	Velocidad de corte	Corriente avance	Avance
[1]			×					×		×
[2]	×		×					×		×
[3]	×	×	×	×		×		×		×
[4]				×		×		×		
[5]			×	×		×		×		×
[6]	×		×					×		×
[7]	×	×	×		×			×		×
[8,9]			×							
[10]			×							
[11]	×		×							
[12]	×		×							
[13,36-38]	×	×	×	×	×		×	×	×	×
[14]	×		×							
[15]	×		×							
[16]	×		×					×		
[17]	×		×					×		×
[18]	×		×				×	×	×	×
[19]	×		×				×			×
[20]				×				×		×
[21]	×	×	×					×		×
[22-24]	×	×	×							
[25]			×				×	×	×	×
[26]	×	×	×							
[27]	×									
[28]				×						×
[29]			×	×	×			×		
[30,31]			×	×						
[32]						×				
[33]				×			×		×	
[34]							×	×	×	×

Por su parte la tabla 2 muestra las técnicas de Inteligencia Artificial que se han aplicado al taladrado de alto rendimiento.

Tabla 2
Resumen de los aportes que se han aplicado al diagnóstico/monitorización del estado de la herramienta en el taladrado

Referencia	Base de reglas	Sistema Borroso	Reconoc. Patrones	Modelo mecánico	Redes MLP	Mapas Kohonen	Redes RCE	Redes ART
[8]								×
[9]							×	
[12]						×		
[15]		×						
[16]					×			
[22,23,39]			×		×			
[25]				×				
[30]					×			
[31]			×					
[33]	×							
[36-38]	×							

1.5.4 Estudio del acabado en los procesos de taladrado de alto rendimiento.

En esta tarea se han incluido los aspectos relacionados con la investigación de nuevos sensores y las técnicas para la verificación y evaluación de la calidad en el taladrado incluyendo criterios industriales tales como la robustez, el coste, velocidad de respuesta, consumo y otros criterios de tipo técnico tales como nuevos sensores en fase de desarrollo para redes de sensores inalámbricas.

La calidad superficial de una pieza se mide con la llamada integridad superficial, que no sólo describe la topología de la superficie, sino que tiene en cuenta también las propiedades mecánicas y metalúrgicas que luego tendrán una importancia vital en la fatiga, resistencia a la corrosión o vida de servicio de la pieza. Habitualmente se utilizan técnicas muy sofisticadas de laboratorio, como son la difracción de rayos X o la inspección metalográfica. Siempre son usadas post-proceso y, en todos los casos, consumen tiempo y coste.

La topología de la superficie viene identificada por la llamada textura superficial, que nos mide varias cantidades relacionadas con las desviaciones producidas en las piezas con respecto a la superficie nominal. Existen desviaciones de 1^{er.} a 6^{to.} orden, de acuerdo con el correspondiente estándar internacional. Las desviaciones de 1^{er.} y 2^{do.} orden son errores de forma, tales como ondulaciones y similares. Las desviaciones de 3^{ro.} hasta 6^{to.} orden, superpuestas, constituyen la llamada rugosidad superficial. Las de orden inferior dependen esencialmente de la herramienta. Las de orden superior, de las propiedades del material de la pieza. La rugosidad superficial es el parámetro más representativo para describir la textura superficial debido a su influencia directa en la fricción, fatiga y resistencias electrónica y térmica.

La medida precisa de la rugosidad superficial se realiza hoy con los modernos rugosímetros pero están limitadas a las aplicaciones post-proceso, con los problemas inherentes correspondientes, como son los tiempos de inspección, los costes, la necesidad de pruebas aleatorias (no todas las piezas) y la producción de desechos, ya que al ser una inspección post-proceso ya no se pueden evitar aquellos con el consiguiente coste y agresión al medio ambiente. Actualmente, el aseguramiento de la calidad se produce en dos fases. La primera usa métodos tipo Taguchi en la etapa de diseño para asegurar la calidad de producto diseñado. Es una acción pre-proceso. Después de fabricada la pieza tiene lugar una inspección post-proceso usando métodos de control estadístico. Se hace imprescindible incorporar una etapa intermedia para asegurar la calidad durante el propio proceso de mecanizado (en proceso). Asegurar el acabado superficial de una pieza durante el proceso de mecanizado no es una tarea sencilla. Se han utilizado sistemas de visión que, a través de una medida de la intensidad reflejada de luz, se puede inferir el valor de la rugosidad superficial.

Sin embargo, los resultados prácticos son, a día de hoy, poco esperanzadores ya que las medidas obtenidas son poco precisas y fiables. Ni los sensores basados en visión, ni los basados en la emisión acústica han funcionado en el ambiente de taller. Por ello, se hace imprescindible desarrollar sensores basados en modelos predictivos. Éstos pueden dividirse básicamente en dos grandes categorías: los basados en la teoría de mecanizado, que son modelos analíticos, que podrían denominarse mecanísticos (e.g, modelos geométricos), y los basados en datos observados, que son modelos empíricos. Los modelos mecanísticos suelen ser modelos más generales. Los empíricos son más específicos y funcionan sólo para ciertas condiciones concretas. Sus prestaciones dependen enormemente de los datos observados: abundancia, integridad, oportunidad, entre otros.

Los modelos mecanísticos utilizados para la predicción de la rugosidad superficial son del tipo geométrico, basados en la geometría del movimiento de un proceso de corte de metal sin tener en cuenta la dinámica de corte. De aquí su primer inconveniente, y es que esos modelos no incluyen parámetros relacionados con la dinámica de corte tales como la velocidad, profundidad de pasada o

el tipo de material de la pieza. El segundo inconveniente es que son puramente teóricos y no utilizan datos experimentales.

Por ello, para la predicción on line de la rugosidad superficial, cada día más se utilizan los modelos empíricos. Un factor de enorme interés a la hora de construir estos modelos empíricos es el diseño de los experimentos para obtener datos observados de calidad. Aquí las técnicas de experimentación factorial deben jugar un importante papel.

En general, el compromiso a la hora de construir modelos empíricos es la adopción de la forma y estructura del modelo y la dependencia del modelo de los datos seleccionados (e.g., de la varianza). Un modelo incorrectamente parametrizado da lugar a un modelo polarizado. Un modelo sobreparametrizado tiene una varianza alta que ajusta muy bien a la muestra pero que puede generalizarse muy mal en el muestreo de validación. El compromiso polarización/varianza es especialmente evidente cuando se parte de un conjunto de datos pequeño, donde una forma suave es difícilmente perceptible por la variabilidad de los datos. La elección entre polarización y varianza en un modelo de red neuronal es más difícil de definir.

Los modelos empíricos son básicamente de dos tipos: modelos estadísticos, basados en las ecuaciones de regresión múltiple no lineal, y los modelos de Inteligencia Artificial, basados, sobre todo, en los conjuntos borrosos (CB) y en las Redes Neuronales Artificiales (RNA).

Un ejemplo típico de ecuación de regresión múltiple no lineal aparece en [21], donde se propone una relación funcional entre la rugosidad superficial y diversas variables independientes:

$$Ra = ch^{\alpha_1} f^{\alpha_2} r^{\alpha_3} d^{\alpha_4} s^{\alpha_5} \quad (4)$$

Donde Ra es la rugosidad superficial (la media aritmética), h es la dureza de la pieza, f la velocidad de avance, r el radio de la herramienta, d la profundidad de pasada y s la velocidad del corte.

Una transformación logarítmica convierte esa ecuación no lineal en lineal:

$$\ln Ra = \ln c + \alpha_1 \ln h + \alpha_2 \ln f + \alpha_3 \ln r + \alpha_4 \ln d + \alpha_5 \ln s \quad (5)$$

que, por simplicidad, se puede escribir como:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_5 \quad (6)$$

donde \hat{y} es el valor estimado de la rugosidad superficial después de la transformación logarítmica. Todos los valores de los parámetros b_i deberán ser estimados, de acuerdo con los datos reales observados del proceso.

En [21] se propone una solución que muestra las relaciones de Ra con el resto de variables independientes. La existencia de ecuaciones de este tipo permite discutir sus resultados desde el punto de vista mecánico. Modelos como éste y otros, desarrollados usando ecuaciones de regresión múltiple, muestran que existen contribuciones contrapuestas de las variables de mérito del mecanizado en aspectos tales como la productividad, el acabado superficial, la precisión dimensional, el coste mecanizado, entre otras. Entre ellas citaremos las más significativas considerando sólo las interacciones más representativas entre las variables y las variables de mérito:

1) la productividad y la rugosidad superior son propiedades del mecanizado que se contraponen,

2) la velocidad de avance tiene una notable influencia en la productividad y, sobre todo, en la rugosidad superficial. La productividad se incrementa con el avance. La calidad superficial disminuye con el avance,

3) la velocidad de corte tiene una notable influencia en la estabilidad del proceso (la aparición de *chatter* regenerativo) y en la rugosidad superficial. La calidad superficial aumenta con la velocidad de corte,

4) la profundidad de pasada tiene una notable influencia en la productividad, en la estabilidad del proceso (aparición del *chatter* regenerativo) y en la rugosidad superficial, y

5) la dureza de la pieza y, sobre todo, el radio de la herramienta influyen en la rugosidad superficial. La calidad superficial aumenta cuando se incrementa el radio de la herramienta.

Las Redes Neuronales Artificiales (RNA) poseen atractivas propiedades para modelar procesos de fabricación que, como éste, son muy complejos:

1º) capacidad de aproximar cualquier función,

2º) funcionamiento adecuado en presencia de ruido,

3º) comportamiento adecuado a la falta de datos,

4º) facilidad para tener en cuenta interacciones desconocidas entre variables y buena generalización.

Las RNA constituyen una alternativa muy potente en el caso de inexistencia de modelos analíticos o cuando un modelo representado por polinomio de bajo orden resulta inapropiado. Típicamente, una RNA consta de unas señales de entrada, que constituyen su capa de entrada, una o más capas ocultas, con nodos computacionales, y una capa de salida también con nodos computacionales. Esta topología se conoce habitualmente como perceptrón multicapa. Una actividad esencial a la hora de utilizar las RNA en modelado es determinar, mediante entrenamiento con datos reales observados, los valores de los pesos sinápticos de todas las neuronas que componen la RNA. Si $y_k(n)$ es la señal de salida de la neurona k y $d_k(n)$ es la salida deseada, consecuentemente se produce una señal de error $e_k(n)$:

$$e_k(n) = d_k(n) - y_k(n) \quad (7)$$

Esta señal de error se utiliza para ajustar los valores de los pesos sinápticos correspondientes de la neurona k . Este mecanismo de ajuste se diseña para que la señal de salida se aproxime lo más posible a la respuesta deseada. Uno de los algoritmos utilizado para el ajuste es el algoritmo de propagación del error hacia atrás conocido como *back-propagation* y es el más utilizados en el modelado de la rugosidad superficial.

En [22] se propone un modelo que utiliza como señales de entrada a la RNA la velocidad de rotación del husillo, la velocidad de avance, la profundidad de corte y la vibración por revolución. La señal de salida es la rugosidad superficial R_a . Según sus resultados, usando una topología para RNA 4-5-1 (5 neuronas en la única capa oculta) se alcanzan precisiones del modelo del 95,87%. Utilizando una topología más potente 4-7-7-1 (dos capas ocultas con 7 neuronas en cada una de ellas) se obtiene una precisión de predicción del 99,27%. Los tiempos de entrenamiento no eran elevados y, sobre todo, una vez entrenadas las RNA, su funcionamiento en tiempo real, según sus autores, estaba garantizado.

Finalizada esta breve presentación del sistema sensorial del taladrado de alto rendimiento, que incluye los subsistemas de monitorización de la máquina, la herramienta y el proceso, pasaremos a describir el nivel supervisor.

El nivel supervisor, está relacionado con la calidad del producto, es el que ha recibido menos atención en investigación y, por tanto, es un área de investigación de futuro. En este nivel podríamos tener en cuenta todos los factores no explícitamente ya tratados y compensados en el diseño de los niveles máquina y de proceso. Este nivel deberá tener en cuenta también las funciones objetivo y, por tanto, las estrategias de mecanizado programadas para cada caso. Incluso se podrían programar estrategias de mecanizado cambiantes durante el proceso de mecanizado de una misma pieza. En este proceso se podrían distinguir diferentes estrategias como: de desbaste, semiacabado y acabado de una forma sencilla. En cualquier caso, el nivel supervisor debería suministrar al resto de niveles, en tiempo real, las condiciones de corte y los valores de las variables de proceso, por ejemplo, el valor de las fuerzas de corte que constituirían a su vez el punto de consigna de los controladores de fuerzas de corte ubicados en el nivel de proceso. Desde un punto de vista funcional, este nivel supervisor sería el encargado de realizar, al menos, las siguientes tareas: supresión de *chatter* y control de la calidad superficial y dimensional de las piezas mecanizadas. Todas sus actividades se deberían desarrollar en proceso.

Otra función importante a implementar en este nivel de supervisión es el control en proceso de la rugosidad superficial, imponiendo unas condiciones de corte que aseguren la rugosidad superficial de las piezas fabricadas. Disponiendo de una unidad sensorial de predicción de la rugosidad superficial, sería factible implementar un sistema de control de la rugosidad superficial. Para ello, habría que analizar los factores que afectan a la rugosidad superficial y modificar en proceso sus valores a fin de obtener los valores de Ra deseados.

Existe una muy numerosa colección de factores que afectan la rugosidad superficial de una pieza. Se pueden clasificar en:

- 1.- Parámetros y variables del mecanizado (velocidad de avance, velocidad de corte, profundidad de corte, ángulo de corte).
- 2.- Propiedades de la herramienta de corte (radio herramienta, forma herramienta, material herramienta).
- 3.- Propiedades de la pieza a mecanizar (dureza, diámetro).
- 4.- Fenómenos de corte (vibraciones, aceleraciones, formación de viruta, variaciones en las fuerzas de corte).

De todas ellas, las más fáciles de controlar on-line son las vibraciones (a través, entre otras, de la supresión del *chatter* regenerativo), la velocidad de avance y la velocidad de corte. Otras variables, como por ejemplo la profundidad de pasada, exigen reescribir el programa pieza y, por tanto, su aplicación resulta muy problemática. Controlando la aparición de *chatter*, la velocidad de avance y la velocidad de corte se podría desarrollar un control efectivo en proceso de la rugosidad superficial.

Otra actividad que debe implementarse a nivel supervisión es la planificación on-line de las estrategias de mecanizado. Dependiendo de la función objetivo en cada caso se determinarían aquellas estrategias.

Ejemplos de estrategias podrían ser las siguientes:

- Desbaste: imponer unas fuerzas de corte máximas, según restricciones. Si aparece *chatter* poner en marcha las técnicas de supresión automática de *chatter*. No utilizar la predicción del acabado superficial de las piezas.

- Acabado: imponer unas fuerzas de corte elevadas. Si aparece *chatter* modificar la velocidad de corte. Poner en marcha la predicción de la rugosidad superficial. Si ésta se sale de rango, disminuir las fuerzas de corte de consigna. Disminuir consecuentemente la velocidad de avance.

1.5.6 Estudio y caracterización del proceso de taladrado de alto rendimiento (TAR). Requisitos de los sistemas inteligentes de monitorización en red del TAR.

El estudio a pie de máquina y la realización diferentes operaciones ha permitido obtener una información que, desde el punto de vista técnico, contribuye a la comprensión de los fenómenos físicos que tienen lugar durante el taladrado de alto rendimiento.

Se ha llevado a cabo una caracterización del TAR tanto físicamente como visto como una caja negra, cuales son las variables que participan y ejercen una mayor influencia sobre el taladrado de alto rendimiento. El estudio teórico incluye la revisión de los CNC abiertos, metodología para obtener y modificar información del CNC, la interacción del este con los dispositivos externos, entre otras cuestiones.

Un esquema conceptual se muestra en la figura 9:

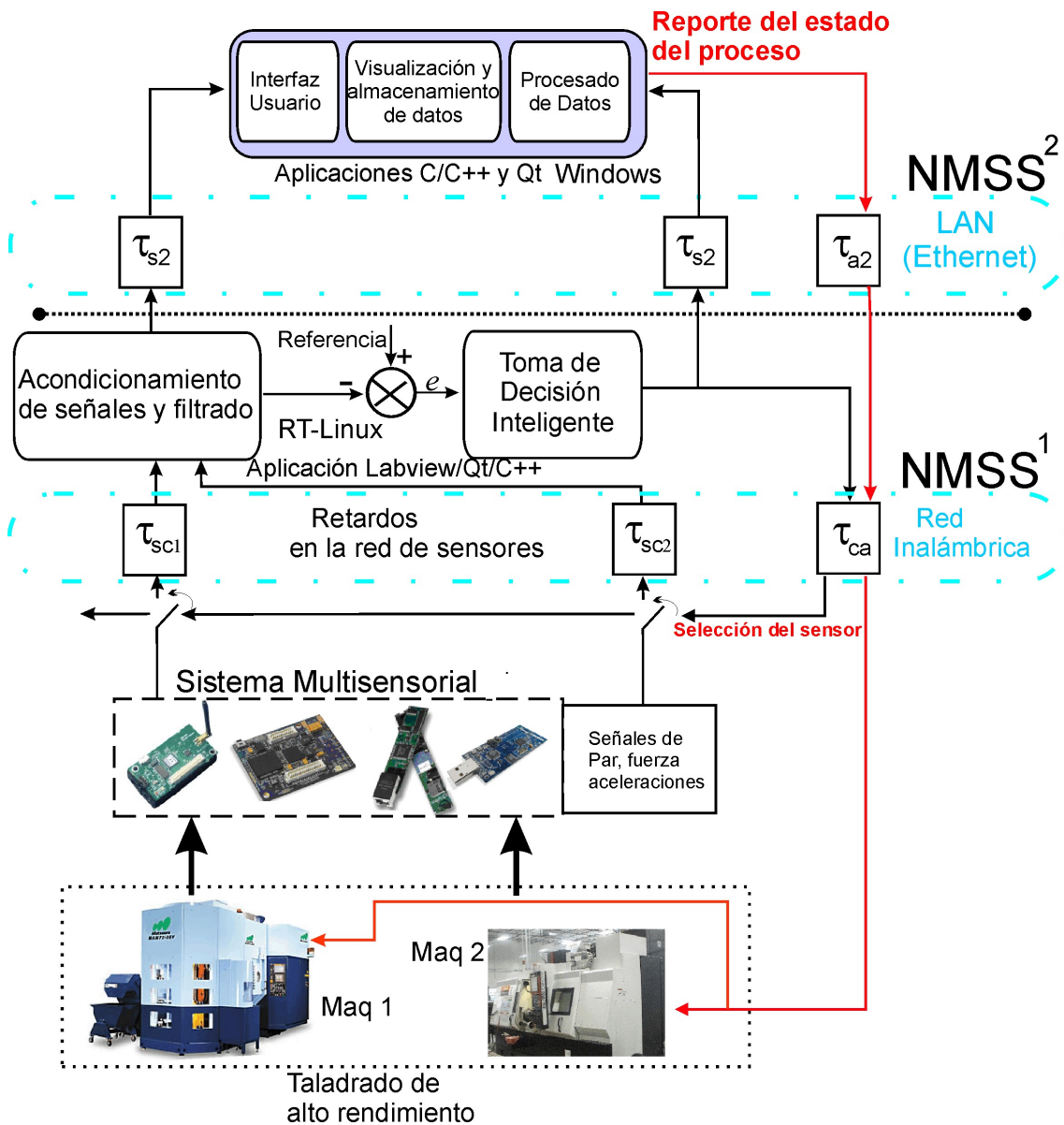


Figura 9. Diagrama conceptual de un sistema inteligente de monitorización en red para procesos de taladrado de alto rendimiento.

A continuación se muestran los resultados de un análisis del modelo dinámico obtenido para la fuerza media frente a cambios en la velocidad de avance en una operación de taladrado de alto rendimiento. Se utilizaron las siguientes condiciones de corte:

- **Diámetro de la herramienta:** 10 mm.
- **Velocidad de giro:** 870 rpm.
- **Profundidad de corte y velocidad de avance:** Se taladró de forma continua hasta una profundidad de corte de 10 mm. Los primeros 5 mm se cortaron a una velocidad de avance de 100 mm/min y los 5 mm restantes a una velocidad de 120 mm/min.

Bajo estas mismas condiciones se realizaron tres réplicas de este experimento (6, 7 y 8), obteniéndose las siguientes curvas de fuerza resultante y fuerza media resultante por vuelta.

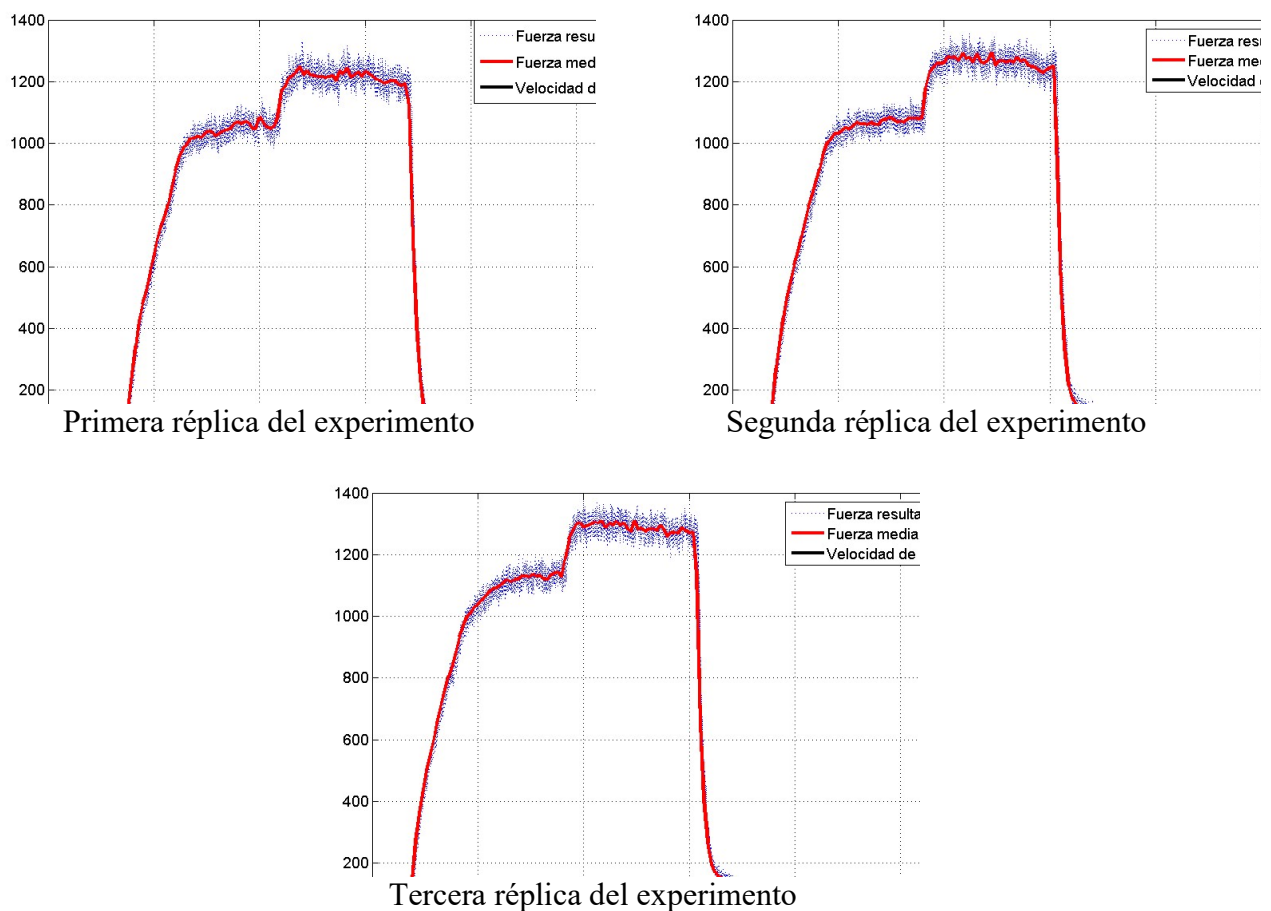


Figura 10. Fuerza resultante obtenida y velocidad de avance aplicada en las tres réplicas del experimento

Con los datos obtenidos de las tres réplicas se realizó una identificación del modelo dinámico del proceso de taladrado para las condiciones de corte dadas. Para ello se utilizó el toolbox de identificación de Matlab. Se obtuvieron modelos de 2do y 3er orden con retraso de transporte, en ambos casos y en todas las réplicas el retraso de transporte es de alrededor de 400 ms.

A partir de los datos de todas las réplicas se obtuvieron los siguientes modelos dinámicos, los cuales están expresados como funciones de transferencia de Fuerza vs. Velocidad de Avance. Se calculó para cada uno de ellos los criterios de error **AAE** (Average Absolute Error) e **ISE** (Integrated Square Error). También se graficó la salida de estos modelos ante los cambios experimentados por la velocidad de avance.

Modelo	Función de transferencia	Criterio AAE	Criterio ISE
P2D_TF	$G(s) = \frac{254.4848}{(s + 6.2)(s + 4)} e^{-0.4s}$	61.7670	147.9352
P3D_TF	$G(s) = \frac{1957.5735}{(s + 7.692)(s + 6.2)(s + 4)} e^{-0.4s}$	78.2184	191.1328
P3D_1_TF	$G(s) = \frac{254484.8109}{(s + 1000)(s + 6.2)(s + 4)} e^{-0.4s}$	61.8863	148.3249
P3D_2_TF	$G(s) = \frac{256602.3407}{(s + 1000)(s + 5.072)^2} e^{-0.4s}$	60.9078	140.8494

Tabla 3. Modelos obtenidos de la primera réplica del experimento.

Modelo	Función de transferencia	Criterio AAE	Criterio ISE
P2D_TF	$G(s) = \frac{259.193}{(s + 6.2)(s + 4)} e^{-0.4s}$	66.8957	132.6611
P3D_TF	$G(s) = \frac{1993.7901}{(s + 7.692)(s + 6.2)(s + 4)} e^{-0.4s}$	83.6680	176.5638
P3D_1_TF	$G(s) = \frac{259460.7497}{(s + 1000)(s + 6.2)(s + 4)} e^{-0.4s}$	66.9486	133.2007
P3D_2_TF	$G(s) = \frac{31325584.1034}{(s + 1000)^2 (s + 3.005)} e^{-0.4s}$	57.2302	97.5670

Tabla 4. Modelos obtenidos de la segunda réplica del experimento.

Modelo	Función de transferencia	Criterio AAE	Criterio ISE
P2D_TF	$G(s) = \frac{264.9969}{(s + 6.2)(s + 4)} e^{-0.4s}$	72.7807	127.4252
P3D_TF	$G(s) = \frac{2032.1808}{(s + 7.692)(s + 6.2)(s + 4)} e^{-0.4s}$	88.2339	171.7606
P3D_1_TF	$G(s) = \frac{266246.8354}{(s + 1000)(s + 6.2)(s + 4)} e^{-0.4s}$	72.9170	128.4265
P3D_2_TF	$G(s) = \frac{42744093.0557}{(s + 1000)^2 (s + 4)} e^{-0.4s}$	64.5254	91.8398

Tabla 5. Modelos obtenidos de la tercera réplica del experimento.

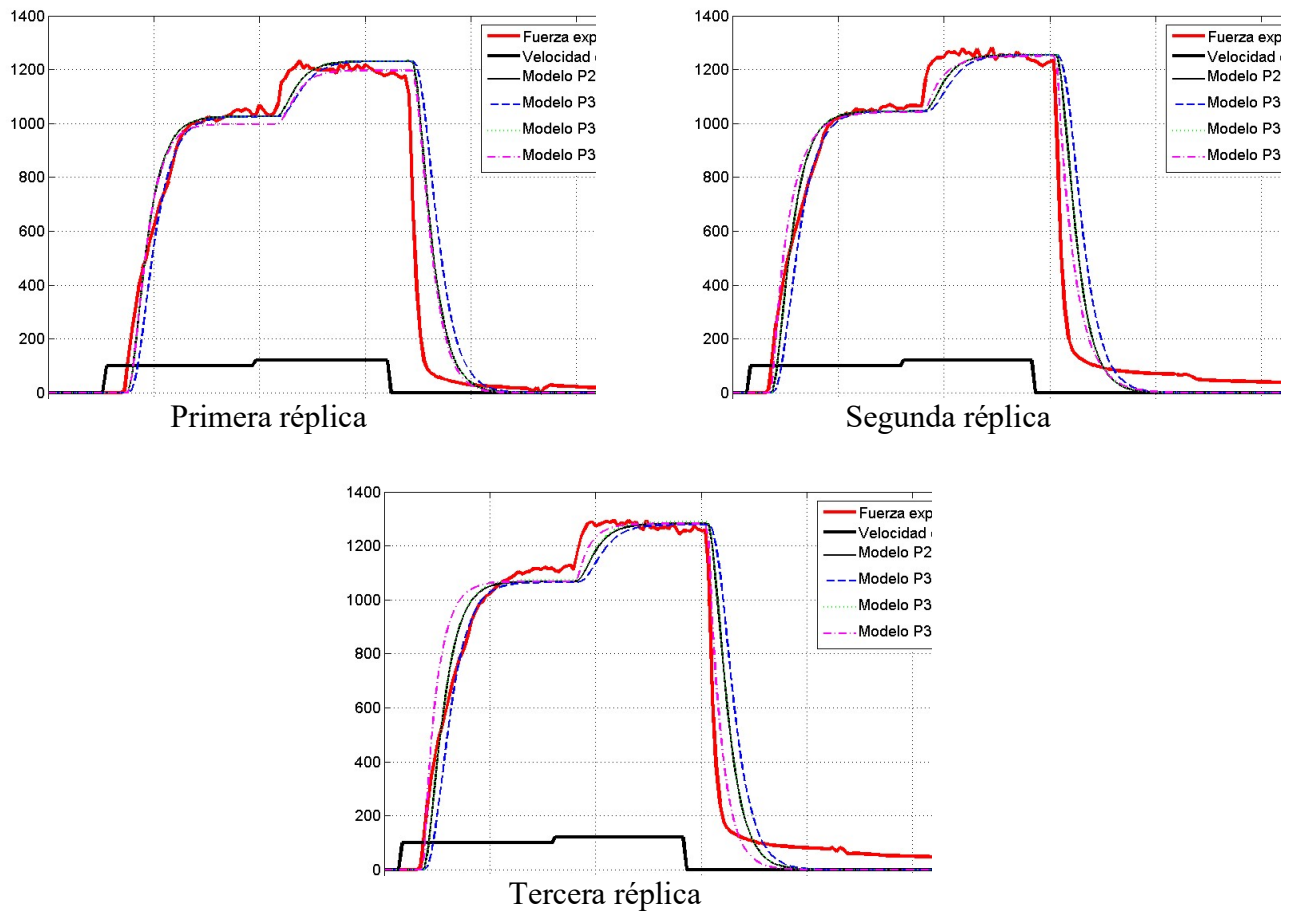


Figura 11. Respuestas de los modelos obtenidos en las tres réplicas del experimento

A continuación se realiza una evaluación de los modelos obtenidos en cada réplica, comparando su desempeño con los datos de cada una de las réplicas.

Modelos	Criterio	AAE			ISE		
	Réplicas	1	2	3	1	2	3
P2D_TF	1	61,767	70,352	81,283	147,94	130,92	126,76
	2	67,128	66,896	75,361	152,64	132,66	126,06
	3	76,421	70,554	72,781	160,03	136,84	127,43
P3D_TF	1	78,218	88,83	100,33	191,13	174,78	170,55
	2	81,488	83,668	92,716	195,29	176,56	170,51
	3	88,588	83,942	88,234	200,71	179,67	171,76
P3D_1_TF	1	61,886	70,482	81,418	148,32	131,31	127,13
	2	67,591	66,949	75,184	153,33	133,2	126,46
	3	78,793	72,408	72,917	162,2	138,41	128,43
P3D_2_TF	1	60,908	79,588	91,116	140,85	129,07	128,68
	2	56,82	57,23	66,254	118,09	97,567	93,037
	3	68,509	62,83	64,525	121,08	99,068	91,84

Nuevos modelos

P1D	First order model	$G(s) = \frac{10.272}{0.38s + 1} e^{-0.28 s}$
------------	-------------------	---

P2D	Second order model	$G(s) = \frac{10.232e^{-0.28 s}}{(0.25s + 1)(0.16s + 1)}$
------------	--------------------	---

P3D	Third order model	$G(s) = \frac{10.262e^{-0.28 s}}{(0.25s + 1)(0.16s + 1)(0.13s + 1)}$
------------	-------------------	--

Model Delay = 0.28

Delay = 0.4

Replicas	1	2	3	1	2	3
P1D_TF_AAE	0.0869	0.0831	0.0999	0.0952	0.0889	0.1000
P1D_TF_ISE	0.1235	0.1013	0.1058	0.1619	0.1287	0.1205
P2D_TF_AAE	0.0872	0.0859	0.1005	0.1088	0.1058	0.1174

P2D_TF_ISE	0.1396	0.1124	0.1096	0.1975	0.1658	0.1551
P3D_TF_AAE	0.1058	0.1012	0.1125	0.1409	0.1376	0.1491
P3D_TF_ISE	0.1928	0.1607	0.1509	0.2564	0.2236	0.2112

Comparación de los modelos con ganancia unitaria con los datos del taladrado de la aleación de acero 4-17 PH, experimento 2.

Replicas	2	3
P1D_TF_AAE	0.1820	0.2040
P1D_TF_ISE	0.2423	0.2563
P2D_TF_AAE	0.1928	0.2180
P2D_TF_ISE	0.2687	0.2885
P3D_TF_AAE	0.2318	0.2558
P3D_TF_ISE	0.3169	0.3407

II. CONCLUSIONES. TRABAJOS FUTUROS.

Desde hace ya 30 años se investiga y desarrolla intensamente estrategias de monitorización y control de los procesos de fabricación. Se han producido en los laboratorios de investigación resultados muy notables. Sin embargo, su desarrollo industrial y comercialización está siendo, a día de hoy, todavía limitada. Lo peor es que no se vislumbra ningún cambio que nos permita pensar que esta situación actual vaya a cambiar en el próximo futuro.

Existen razones muy diversas. Primero debemos hablar de la falta de robustez de los sensores y los algoritmos de monitorización actuales. Las mediciones directas en proceso son casi imposibles debido al ambiente tan hostil en el que desarrolla el mecanizado: presencia de virutas, fluidos, ruidos, vibraciones, entre otros. Las medidas indirectas que recurren, como ya se ha comentado, a modelos mecánicos o empíricos fallan a menudo debido a las perturbaciones, no linealidades y el comportamiento emergente de los procesos de fabricación. Además, hay falta de coordinación evidente entre los diversos grupos de investigación del mundo y las empresas. Durante largo tiempo, muchos de ellos han investigado en los procesos de desgaste de la herramienta sin ninguna coordinación y con mucho solapamiento. Y muy pocos lo han hecho en los procesos de calidad superficial. Existe una evidente falta de estandarización en la automatización de estos procesos. Actualmente, no existen aún códigos para los sensores o protocolos para los controladores para sistemas de arquitectura abierta, similares a los ya existentes en los sistemas CNC actuales. Las curvas de aprendizaje para los usuarios de taller son muy duras y los integradores de sistemas no quieren asumir tales responsabilidades. Además, los primeros resultados de laboratorio, una vez transferidos al taller, no han mostrado los resultados esperados. Por ello, a día de hoy los usuarios finales continúan siendo escépticos respecto a los beneficios reales de estos sistemas de monitorización, control y supervisión.

Sin embargo, este estudio ha servido para generar conocimientos científicos técnicos clave para mejorar la competitividad y han permitido identificar líneas de actuación futura muy prometedoras. Dos direcciones de investigación muy claras de cara al futuro serán el desarrollo de sistemas de monitorización y control embebidos en los CNC actuales y la utilización de las redes de datos, en especial inalámbricas, en aquellos sistemas que lo permitan. Los sistemas embebidos vuelven a demandar arquitecturas abiertas. Hay que hacer notar aquí que numerosos fabricantes de CNC renombrados no disponen aún de sistema CNC con arquitecturas abiertas.

La influencia de las redes de comunicación será enorme en el futuro. La localización de los talleres, de las máquinas y de los procesos dejará de tener importancia. La estandarización y flexibilidad serán otros factores importantes sobre todo a la hora de embeber sistemas sensoriales y de control en los CNC actuales y futuros.

Finalmente diremos que las comunicaciones inalámbricas tendrán un papel esencial en esas redes, disminuyendo los costes y los tiempos de puesta en operación de estos sistemas de monitorización, control y supervisión de los procesos de alto rendimiento. Los nuevos procesos de alto rendimiento y otros similares suponen un nuevo reto a los que habrá que enfrentarse en el próximo futuro.

I.5.7 Referencias analizada primera fase del estudio.

- [1] A. Thangaraj, P.K. Wright, Computer-assisted prediction of drill failure using in-process measurements of thrust force, *Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME* 110 (1988) 192–200.
- [2] A. Gajate, R. E. Haber, P. I. Vega, and J. R. Alique, "A transductive neuro-fuzzy controller: Application to a drilling process," *IEEE Transactions on Neural Networks*, Article vol. 21, no. 7, pp. 1158-1167, 2010, Art. no. 5492227.
- [3] U. Schehl, *Werkzeugüberwachung mit Acoustic-Emission beim Drehen, Fraßen und Bohren*, Aachen, 1991.
- [4] S.R. Hayashi, C.E. Thomas, D.G. Wildes, Tool break detection by monitoring ultrasonic vibrations, *Annals of the CIRP* 37 (1) (1988) 61–64.
- [5] K. Kutzner, U. Schehl, *Werkzeugüberwachung von Bohrern kleinen Durchmessers mit Körperschallsensoren*, *Industrie Anzeiger* 110 (82) (1988) 32–33.
- [6] S.C. Lin, C.J. Ting, Tool wear monitoring in drilling using force signals, *Wear* 180 (1-2) (1995) 53–60.
- [7] S. Braun, E. Lenz, C.L. Wu, Signature analysis applied to drilling, *Journal Mechanical Design, Transactions of the ASME* 104 (1982) 268–276.
- [8] I.N. Tansel, C. Mekdeci, O. Rodriguez, B. Uragun, Monitoring drill conditions with wavelet based encoding and neural network, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 33 (4), (1993) 559–575.
- [9] I.N. Tansel, O. Rodriguez, C. Mekdeci, Detection of tool breakage in microdrilling operation with RCE neural networks, *PED, ASME* 47 (1) (1992) 83–88.
- [10] C. Von Nedeß, T. Himburg, *Automatisierte Überwachung des Bohrens*, *VDI-Z*, Bd 128 (17) (1986) 651–657.
- [11] K. Christoffel, W. Jung, *Überwachungseinheit für die Bohrbearbeitung*, *Industrie Anzeiger* 103 (62) (1981) 198–199.
- [12] E. Govekar, I. Grabec, Self-organizing neural network application to drill wear classification, *Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME* 116 (3) (1994) 233–238.
- [13] E. Jantunen, H. Jokinen, Automated On-line Diagnosis of Cutting Tool Condition (Second version), *International Journal of Flexible Automation and Integrated Manufacturing* 4 (3-4) (1996) 273–287.
- [14] W. König, K. Christoffel, *Sensoren für die Bohrbearbeitung*, *Industrie Anzeiger* 103 (100) (1980) 29–33.
- [15] P.G. Li, S.M. Wu, Monitoring drilling wear states by a fuzzy pattern recognition technique, *Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME* 110 (2) (1988) 297–300.
- [16] T.I. Liu, K.S. Anantharaman, Intelligent classification and measurement of drill wear, *Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME* 116 (1994) 392–397.
- [17] T. Radhakrishnan, S.M. Wu, On-line hole quality evaluation for drilling composite material using dynamic data, *Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME* 103 (1981) 119–125.
- [18] M. Routio, M. Saäynaäjtjoki, Tool wear and failure in the drilling of stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology* 52 (1) (1995) 35–43.
- [19] K. Subramanian, N.H. Cook, Sensing of drill wear and prediction of drill life (I), *Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME* 101 (1977) 295–301.
- [20] T.I. El-Wardany, D. Gao, M.A. Elbestawi, Tool condition monitoring in drilling using vibration signature analysis, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 36 (6) (1996) 687–711.
- [21] E. Lenz, J.E. Mayer, D.G. Lee, Investigation in drilling, *Annals of the CIRP* 27 (1) (1978) 49–53.

- [22] A. Noori-Khajavi, Frequency and time domain analyses of sensor signals in a drilling process and their correlation with drill wear, PhD Thesis, Oklahoma State University, Stillwater, OK, 1992.
- [23] A. Noori-Khajavi, R. Komanduri, On multisensor approach to drill wear monitoring, *Annals of the CIRP* 42 (1) (1993) 71–74.
- [24] A. Noori-Khajavi, R. Komanduri, Frequency and time domain analyses of sensor signals in drilling, part 1: correlation with drill wear, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 35 (6) (1995) 775–793.
- [25] K. Ramamurthi, C.L. Hough Jr., Intelligent real-time predictive diagnostics for cutting tools and supervisory control of machining operations, *Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME* 115 (1993) 268–277.
- [26] M. Valikhani, S. Chandrashekar, An experimental investigation into the comparison of the performance characteristics of TiN and ZrN coatings on split point drill using the static and stochastic models of the force system as a signature, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2 (1) (1987) 75–106.
- [27] E. Brinksmeier, Prediction of tool fracture in drilling, *Annals of the CIRP* 39 (10) (1990) 97–100.
- [28] R. E. Haber, K. Cantillo, and J. E. Jiménez, "Networked sensing for high-speed machining processes based on CORBA," *Sensors and Actuators, A: Physical*, Article vol. 119, no. 2, pp. 418-426, 2005.
- [29] S. Braun, E. Lenz, *Machine Tool Wear Monitoring, Mechanical Signature Analysis, Theory and Applications*, pp. 321–342, Academic Press Ltd, 1986.
- [30] T.I. Liu, E.J. Ko, On-line recognition of drill wear via artificial neural networks, monitoring and control for manufacturing processes, *PED, ASME* 44 (1990) 101–110.
- [31] T.I. Liu, S.M. Wu, On-line detection of drill wear, *Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME* 112 (1990) 299–302.
- [32] A.L. Quadro, J.R.T. Branco, Analysis of the acoustic emission during drilling test, *Surface & Coating Technology* 94-95 (1-3) (1997) 691–695.
- [33] F. Erdelyi, C. Santha, Monitoring tasks on boring and milling production cells, *Computers in Industry* 7 (1986) 65–71.
- [34] X. Li, On-line detection of the breakage of small diameter drills using current signature wavelet transform, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 39 (1) (1999) 157–164.
- [35] R.B. Randall, *Application of B&K Equipment to Frequency Analysis*, ISBN 87 87355 14 0, Bruel & Kjaer, 1977.
- [36] E. Jantunen, A solution for tool wear diagnosis, in: *Proceedings 1010 E. Jantunen / International Journal of Machine Tools & Manufacture* 42 (2002) 997–1010 of Comadem'99, Coxmoor Publishing Company, Oxford, UK, 1999, pp. 95–104.
- [37] E. Jantunen, H. Jokinen, Reduction of data needed in an expert system for condition monitoring of FMS using regression analysis techniques, in: *Proceedings of Comadem'96*, ISBN 1-85075- 635-X, University of Sheffield, Sheffield, 1996.
- [38] E. Jantunen, H. Jokinen, R. Milne, Flexible expert system for automated on-line diagnosis of tool condition, in: *Integrated Monitoring Diagnostics & Failure Prevention, Technology Showcase, 50th MFPT, Mobile, Alabama, 1996*, pp. 259–268.
- [39] A. Noori-Khajavi, R. Komanduri, Frequency and time domain analyses of sensor signals in drilling, part 2: investigation of the problems associated with sensor integration, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 35 (6) (1995) 795–815.
- [40] -, *Smart Machine Platform Initiative: Technology and Resource Plan, Coalition on Manufacturing Technology Infrastructure (CMTI), AMT, NCDMM, NCMS, NACFAM, NTMA, SME&TechSolve, Confidential Report*, pp. 1-40, marzo 2004.

- [41] R. E. Haber-Guerra, R. Haber-Haber, D. M. Andrés, and A. A. Palomar, "Networked fuzzy control system for a high-performance drilling process," *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, Article vol. 130, no. 3, pp. 0310091-0310096, 2008.
- [42] HLG-ManuFuture, *The Manufuture road to high adding value and sustainable manufacturing. Part II. Manufuture workprogramme and research topics. Development of transsectorial Roadmaps*, vol. Deliverable 2.5, pp. 1-118, May-Jun 2007.
- [43] Pristschow, Y. Altintas, F. Jovane, and F. Koren, *Open controller architecture-Past, present and future*, *Annals of CIRP*, vol. 50, pp. 463-470, 2001.
- [44] R. G. Landers, A. G. Ulsoy, and Y. H. Ma, "A comparison of model-based machining force control approach," *Int. Journal of Machine Tools and Manufacture* vol. 44, pp. 733-748, 2004.
- [45] Fundación OPTI, *Automatización integral de la empresa industrial. Estudio de prospectiva*, Ministerio de Industrial, Turismo y Comercio, 2007.
- [46] J. B. Kim, S. J. Lee, and Y. P. Park, *Stable and Efficient Drilling Process by Active Control of the Thrust Force*, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 8, pp. 585-595, Sep 1994.
- [47] R. J. Furness, T. C. Tsao, J. S. Rankin, M. J. Muth, and K. W. Manes, *Torque control for a form tool drilling operation*, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 7, pp. 22-30, Jan 1999.
- [48] Y. T. Oh, G. D. Kim, and C. N. Chu, *Design of a drilling torque controller for a machining center*, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 22, pp. 329-335, Oct 2003.
- [49] Y. T. Oh, W. T. Kwon, and C. N. Chu, *Drilling torque control using spindle motor current and its effect on tool wear*, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 24, pp. 327-334, 2004.
- [50] S. Y. Liang, R. L. Hecker, and R. G. Landers, *Machining process monitoring and control: The state-of-the-art*, *Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME*, vol. 126, pp. 297-310, May 2004.
- [51] R. M. Del Toro, M. C. Schmittiel, R. E. Haber-Guerra, and R. Haber-Haber, "System identification of the high performance drilling process for network-based control," in *2007 Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, DETC2007*, vol. 1 PART B, pp. 827-834.
- [52] R.E. Haber Guerra, F. Martínez Puente, R.M. del Toro, M. Schmittiel, D. Martín Andrés, *Procedimiento y Sistema de Modelado para Procesos de Taladrado*, Patente solicitada PCT/ES2008/070038.
- [53] R. E. Haber, J. R. Alique, A. Alique, and R. H. Haber, "Controlling a complex electromechanical process on the basis of a neurofuzzy approach," *Future Generation Computer Systems*, vol. 21, no. 7, pp. 1083-1095, 2005.
- [54] AIRBUS-España, S.L., *Optimización del proceso de taladro de materiales de uso estratégico en la industria aeronáutica*, PETRI TEP-136, 2004-2006
- [55] Fundación Fatronik, *Optimización del taladrado de piezas multicapa en estructuras aeronáuticas (milhojas)*. PROFIT2003.000213. 2003-2005.
- [56] M. Sánchez, *Optimización del proceso de taladrado de materiales de uso estratégico en la industria aeronáutica*, DPI2001-3747, Universidad de cadiz, Escuela Superior de Ingeniería de Cadiz, 2001-2004.
- [57] A. G. Martín and R. E. H. Guerra, "Internal model control based on a neurofuzzy system for network applications. A case study on the high-performance drilling process," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 367-372, 2009.

1.5.8 Referencias analizadas segunda fase del estudio.

- [1] Nacional Research Council. Visionary Manufacturing challenges for 2020. Commission on Engineering and Technical Systems. National Academy Press. Washington, 1998.
- [2] Chen, et al., Real-Time compensation for time-variant volumetric error on a machining center. ASME. Atlanta Annual Meeting, 1991.
- [3] Tikhon, et al., NURBS interpolator for constant material removal rate in open NC machine tools. Int. J. of Machine Tools and Manufacture. vol.44, 2004.
- [4] Tomizuka, M., On the design of digital tracking controllers. ASME. Journal of dynamic systems, measurement and control , Special 50 Anniversary, 1993.
- [5] Koren, Y., Lo, C.C., Advanced controllers for feed drives. CIRP Annals. vol.2, 1992.
- [6] Koren, Y., Cross-Coupled computer control for manufacturing systems. ASME. Journal of dynamic systems, measurement and control. vol.102, 1980.
- [7] Landers, R.G., et al., A comparison of model-based machining force control approaches., Int. J. of Machine Tools and Manufacture, 2004.
- [8] Carrillo, F.J., et.al., Delta approach robust controller for constant turning force regulation. Control Engineering Practice. vol.7 (11), 1999.
- [9] Hayes, R.D., et al., Robust control design for milling processes. DSC- vol50. PED- vol. 63. ASME Annual Meeting, 1993.
- [10] Nordgren, R.E., Nwokah, O.D.I., Parametric and unstructured uncertainty models in discrete time systems. DSC vol.55-1. ASME Annual Meeting, 1994.
- [11] Rober, S.J., et al., A digital robust controller for cutting force control in the end milling process, ASME .Journal of dynamic systems, measurement and control, vol 119(2), 1997.
- [12] Haber, R.E., Alique, J.R., et al., Toward intelligent machining : hierarchical fuzzy control for the end milling process. IEEE Trans. Control Systems Technology. vol. 6 (2), 1998.
- [13] Lin L.C., Lee, G.Y., Hierarchical fuzzy control for C- axis of CNC turning centers using genetic algorithms. Journal of Intelligent and Robotics systems. vol. 25(3), 1999.
- [14] Haber R.E. et al., Linear and fuzzy control for machining processes. Proceed. IFAC Workshop Advanced fuzzy/neural control, 2001.
- [15] Lee, C.C., Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller. IEEE Trans. on systems, man and cybernetics. vol.20(2), 1990.
- [16] Haber, R.E., Alique, J.R., Nonlinear internal model control using neural networks : an application for machining processes, Neural Computing and Applications, Vol. 13, 2004.
- [17] Delio., et al., Use of audio signals for chatter detection and control. ASME Journal of Engineering for Industry. Vol. 114(2), 1992.
- [18] Altintas, Y. Chan, P.K., In process detection and suppression of chatter in milling. Inter. J. of Machine Tools and Manufacture. Vol. 32 (3), 1992 .
- [19] Tarng, Y.S., Li, T.C., Detection and suppression of drilling chatter. ASME Journal of dynamic systems, measurement and control, vol.116(4), 1994.
- [20] Bailey, T., et al., Open architecture controller for die and mold machining. American Control Conference. Washington, 1995.
- [21] Feng C.X., Wang, X.F. Surface roughness predictive modeling : neural networks versus regression. IIE Transactions, 2003.
- [22] Tsai Y.H., et al., An in process surface recognition system based on neural networks in end milling cutting operations. Int. J. of Machine Tools and Manufacture, vol.39, 1999.
- [23] Smith S., Tlusty, J., Efficient simulation programs for chatter in milling, Annals of the CIRP vol. 42/1, 1993.
- [24] Weck M., et al., CAD Assisted chatter free NC tool path generation in milling. Int.J.of Machine Tools and Manufacture. vol.34(6), 1994.

- [25] Ismail. F., Soliman E., A new method for the identification of stability lobes in machining. *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*. Vol 37, 1997.
- [26] Altintas Y., Manufacturing automation. *Metal cutting mechanics. Machine tool vibrations and CNC Design*. Cambridge University Press, 2004.
- [27] Insperger T., Stepan G., Stability of high speed milling. *Proceed. Symp. on nonlinear dynamics and stochastic mechanics*. Vol. 241, 2000.
- [28] Jimenez J.E., Alique J.R., et al., Nuevo método analítico- experimental para la identificación de los diagramas de lóbulos de estabilidad en fresado a alta velocidad. *XV Congreso de Máquinas- herramienta y Tecnologías de Fabricación*. Octubre, 2004.
- [29] Soliman E., Ismail F., Chatter suppression by adaptive speed modulation. *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*. Vol. 37. 1997.
- [30] Altintas Y., et al., Analytical stability prediction and design of variable pitch cutters. *Int. Mechanical Engineering Congress*. California, 1998.
- [31] Haber R. E, J. R. Alique, S. Ros, and R. H. Haber, "Modeling and simulation of high-speed machining processes based on matlab/simulink," *International Conference on Computational Science in Lecture Notes in Computer Science*, 2005, vol. 3516, pp. 627-634.