



Universitat de Girona

CONTRIBUCIÓN AL DESARROLLO DEL PROCESO DE SELECCIÓN DE CENTROS DE MECANIZADO DE ALTA VELOCIDAD, BASADO EN PARÁMETROS TECNOLÓGICOS Y DE PRODUCTIVIDAD

Marta ALBERTÍ IBARZ

ISBN: 978-84-693-6119-1

Dipòsit legal: GI-1034-2010

<http://www.tesisenxarxa.net/TDX-0825110-112234/>

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.



Universitat de Girona

TESIS DOCTORAL

**CONTRIBUCIÓN AL DESARROLLO DEL PROCESO DE SELECCIÓN
DE CENTROS DE MECANIZADO DE ALTA VELOCIDAD,
BASADO EN PARÁMETROS TECNOLÓGICOS Y DE PRODUCTIVIDAD**

Marta Albertí Ibarz

2010

PROGRAMA DE DOCTORADO:

**PROYECTOS DE INNOVACIÓN TECNOLÓGICA
EN INGENIERÍA DE PRODUCTO Y PROCESO**

Directores: Dr. Joaquim de Ciurana Gay y Dr. Ciro A. Rodríguez González

Memoria presentada para optar al título de doctora por la Universitat de Girona

*A la petita Clàudia,
la nineta dels meus ulls.*

Agradecimientos

A mis directores de tesis, Dr. Quim de Ciurana y Dr. Ciro A. Rodríguez, que me han guiado en el largo viaje que ha sido la elaboración de esta tesis. A Quim quiero agradecerle especialmente su tesón, su insistencia y su apoyo, sin los cuales jamás hubiera acabado este trabajo, así como su guía a lo largo del trayecto. A Ciro quiero darle las gracias por su soporte desde la distancia, en los aspectos técnicos y metodológicos de la tesis.

A la Fundación ASCAMM, donde realicé una parte importante del trabajo experimental, y especialmente a Xavier Plantà, que me brindó los medios, a Àlex Crehuet, que me ofreció su conocimiento y paciencia, y a Traian Onaciu, que no sólo realizó las mediciones en las piezas fabricadas sino que además me facilitó la herramienta utilizada para el tratamiento de los datos.

Al Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación de la Universitat Jaume I y al Instituto Tecnológico de Monterrey, que pusieron sus equipos a disposición de este trabajo.

A los compañeros del GREPP, y especialmente a Martí Casadesús, que estuvo presente en la definición inicial del tema de la tesis, a Guillem Quintana y Albert Vidal, cuyo trabajo me ha servido de apoyo en la realización del mío, y a los que, de una forma u otra, colaboraron en la mecanización de algunas piezas.

A los compañeros del Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación de la Universitat de Girona, especialmente a M. Luisa García-Romeu, por su compañerismo y empatía tanto en el ámbito docente y de investigación como en el personal, y a Marta Reig, por tantas y tantas llamadas que hemos intercambiado...

... y a todos los compañeros y amigos que, con su eterna pregunta, ¿y tú cuándo acabas la tesis?, me han impedido rendirme. Sin duda esta es la pregunta que más veces me han hecho desde que, hace ya demasiado tiempo, me embarqué en esta aventura. Estoy segura que sabrán que pienso en ellos.

A mi querida familia: mis padres, Pere y Roser, porque sin ellos hoy no sería quien soy, y a mi hermana Laura, que, junto a Jaume, me han hecho creer que sí podía. También a mi "familia política", que no ha dejado de animarme.

Finalmente, quiero darle las gracias a Toni, por empujarme a seguir, por creer en mí y, sobretodo, por estar a mi lado durante todo este tiempo.

Clàudia, tu llegada al mundo ha sido la mayor motivación. Espero recompensarte pronto por el tiempo que no hemos compartido.

A todos vosotros, mil gracias.

Tesis doctoral presentada como compendio de los siguientes artículos ya publicados:

- § Albertí, M., Ciurana, J., Casadesús, M. (2005): “A system for optimising cutting parameters when planning milling operations in high speed machining” *Journal of Materials Processing Technology*, 168, 25-35.
- § Albertí, M., Ciurana, J., Rodríguez, C. A. (2007): “Experimental analysis of dimensional error vs. cycle time in high speed milling of aluminium alloy”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47(2), 236–246.
- § Albertí, M., Ciurana, J., Rodríguez, C. A., Özel, T. (2009): “Design of a decision support system for machine tool selection based on machine characteristics and performance tests”. *Journal of Intelligent Manufacturing*. *In press*.
- § Flores, V., Ortega, C., Albertí, M., Rodríguez, C.A., Ciurana, J., Elías, A. (2007): “Evaluation and modeling of productivity and dynamic capability performance machining centers”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 33 (3-4) 403 – 411.

Los índices de calidad de las publicaciones mencionadas se recogen a continuación:

| Referencia | Posición de la revista (año de publicación) | Índice de impacto (año de publicación) |
|----------------------|--|---|
| Albertí et al., 2005 | 15/38 | 0,592 |
| Albertí et al., 2007 | 3/38 | 1,120 |
| Albertí et al., 2009 | 16/39 | 1,018 |
| Flores et al., 2007 | 29/38 | 0,378 |

Tabla de contenido

| | |
|---|----|
| Capítulo 1. Definición del tema de investigación | 15 |
| 1.1. Introducción..... | 15 |
| 1.2. Exposición del problema | 17 |
| 1.3. Objetivos de la tesis | 18 |
| 1.4. Metodología y ámbito de aplicación | 20 |
| 1.5. Estructura de la tesis..... | 21 |
| Capítulo 2. Introducción a la investigación | 23 |
| 2.1. Mecanizado de alta velocidad: fresado | 27 |
| 2.1.1. Origen y evolución..... | 27 |
| 2.1.2. Características..... | 29 |
| 2.1.3. Aplicaciones: fresado | 34 |
| 2.1.4. Análisis del mecanizado de alta velocidad frente a otras tecnologías de corte .. | 37 |
| 2.2. Equipos necesarios para el fresado de alta velocidad | 48 |
| 2.2.1. Máquinas-herramienta..... | 48 |
| 2.2.2. Herramientas..... | 55 |
| 2.2.3. Portaherramientas | 57 |
| 2.2.4. Controles numéricos..... | 60 |
| 2.3. Análisis de la precisión dimensional..... | 66 |
| 2.4. Análisis del tiempo de ciclo | 67 |
| 2.5. Modelización del proceso de mecanizado de alta velocidad..... | 69 |
| 2.6. Selección de centros de mecanizado para alta velocidad..... | 71 |

| | |
|---|-----|
| 2.7. Síntesis del estado del arte | 72 |
| 2.8. Descripción de los trabajos realizados | 75 |
| Capítulo 3. Artículo “Experimental analysis of dimensional error vs. cycle time in high-speed milling of aluminium alloy” | 79 |
| Capítulo 4. Artículo: “Evaluation and modeling of productivity and dynamic capability in high-speed machining centers” | 93 |
| Capítulo 5. Artículo: “A system for optimising cutting parameters when planning milling operations in high-speed machining” | 105 |
| Capítulo 6. Artículo: “Design of a decision support system for machine tool selection based on machine characteristics and performance tests” | 119 |
| Capítulo 7. Conclusiones y desarrollos futuros..... | 137 |
| 7.1. Conclusiones..... | 137 |
| 7.1.1. Resultados del trabajo experimental | 140 |
| 7.1.2. Sistema de selección de centros de mecanizado para alta velocidad..... | 143 |
| 7.1.3. Aplicabilidad de los resultados obtenidos | 145 |
| 7.2. Contribuciones de la tesis | 146 |
| 7.3. Trabajos futuros | 148 |
| Capítulo 8. Referencias | 149 |

Resumen

La selección de centros de mecanizado de alta velocidad es un proceso complejo que requiere de mucha experiencia, puesto que en él intervienen un gran número de variables, tanto tecnológicas como económicas. Existen metodologías orientadas a seleccionar el centro de mecanizado óptimo, considerando únicamente una de estas dos tipologías de variables, sin embargo, esta tesis propone una metodología que contempla ambos tipos. Para ello se identifican las variables que tienen mayor influencia sobre los resultados del proceso de mecanizado, tanto desde un punto de vista de calidad de las piezas fabricadas como de la economía de la fabricación, y se propone un modelo de selección basado en los resultados de un trabajo experimental realizado sobre piezas de aluminio. Dicho modelo se implementa mediante redes neurales, cuyo entrenamiento se realiza en base a los resultados del trabajo experimental mencionado.

Abstract

The selection of high speed machining centers is a complex process that requires a lot of experience, because it involves a large number of variables, both technological and economic. There are methodologies designed to select the optimal machining center, considering only one of these two types of variables. However, this thesis proposes a methodology that considers both of them. The variables that have the greatest influence on the results of the machining process are identified, considering both the quality of the manufactured parts and the economy of the manufacturing process. A selection model is proposed, based on the results of an experimental work done with aluminum parts. This model is implemented using neural networks, whose training is conducted based on the results of the aforementioned experimental work.

Capítulo 1. Definición del tema de investigación

1.1. Introducción

Uno de los mayores desafíos de la tecnología de arranque de material es el de fabricar productos de gran calidad con una productividad elevada. Esto supone un reto importante puesto que, tradicionalmente, los elevados ratios de productividad van asociados a un incremento de las vibraciones en el corte y, por lo tanto, a una calidad superficial y precisiones dimensional y geométrica bajas.

Con el objetivo de conseguir elevados ratios de arranque de material por unidad de tiempo, y buenos acabados superficiales simultáneamente, a finales del siglo XX se llevaron a cabo investigaciones importantes (Schultz, 1989; Schultz y Moriwaki, 1992; Tlusty, 1993) para determinar las condiciones y estrategias de corte óptimas que pudieran proporcionar grandes productividades, manteniendo la elevada calidad de los productos, así como una vida de las herramientas y las máquinas-herramienta razonablemente larga.

Fruto de dichas investigaciones, el mecanizado de alta velocidad (High Speed Machining- HSM en terminología anglosajona) empezó a establecerse como una tecnología que permitía optimizar la velocidad de corte como un modo de obtener mayor productividad. Sin embargo, el mecanizado de alta velocidad (en adelante HSM) sufrió una gran evolución, especialmente en la década de los 90 (Aspinwall et al., 2001), cuando se empezó a pensar en esta tecnología como modo de mecanizar materiales que hasta el momento eran muy difícilmente mecanizables, como por ejemplo el acero templado o el titanio. Para esta aplicación, ya no era suficiente incrementar la velocidad de corte, sino que era necesario, además, aplicar técnicas, medios y estrategias específicos que permitieran mantener la vida de la herramienta dentro de un margen económicamente aceptable.

De esta forma, el mecanizado de alta velocidad se ha ido posicionando a lo largo de los años hasta convertirse en una tecnología claramente diferenciada del mecanizado tradicional, con aplicaciones específicas y con un elevado grado de utilización en un número cada vez más amplio

de sectores, entre los que destacan el aeronáutico, el de los moldes y matrices y el de tratamiento del aluminio (Padilla, 1998; Pasko et al., 2002).

Por lo tanto, aunque se trata de una tecnología ampliamente difundida, no se ha establecido una definición estricta de lo que supone "alta velocidad", puesto que la definición debería basarse en el tipo de material de la pieza que se mecanice, así como en el tipo de operación en cuestión (Fallböhmer et al., 2000). En general, el HSM consiste en incrementar algunos de los parámetros de corte (avance o velocidad de corte) o todos ellos, hasta 10 veces respecto a los valores que se utilizarían tradicionalmente para la misma aplicación. Esta definición, sin embargo, no es exhaustiva, puesto que no contempla la posibilidad del mecanizado de materiales que no se puedan tratar por métodos convencionales.

Las tecnologías que están siendo sustituidas por el mecanizado de alta velocidad son, principalmente, el mecanizado tradicional y la electroerosión, aunque, sobretodo en el último caso, hay geometrías que hacen imposible la aplicación del HSM. En estos casos se siguen utilizando los procesos de fabricación tradicionales. En algún sector, como por ejemplo el de fabricación de moldes y matrices, el mecanizado de alta velocidad está sustituyendo, además, el acabado manual de los productos.

Las principales ventajas del HSM respecto a las otras tecnologías anteriormente mencionadas son el elevado ratio de arranque de material y las bajas fuerzas de corte que se producen durante el mecanizado (Dewes, 1997), lo que conlleva una mínima deformación de las piezas, así como la posibilidad de mecanizar paredes delgadas. Destacan también como puntos fuertes el aumento de la precisión de las piezas mecanizadas, no solamente de los contornos sino también de las tolerancias dimensionales, así como la mejora del acabado superficial de las mismas (Schultz, 1992).

Sin embargo, se han identificado también ciertos inconvenientes, que tienen relación principalmente con el elevado coste de los equipos y herramientas necesarios, teniendo en cuenta, además, que el desgaste de la herramienta es muy superior al que correspondería al mecanizado tradicional (Fallböhmer et al., 2000), motivo por el cual se hace necesario el uso de materiales de corte avanzados.

1.2. Exposición del problema

Actualmente, para ser competitivas, las empresas deben conseguir y aplicar recursos para crear valor, ofreciendo productos y servicios de gran calidad, de forma rápida, e intentando mejorar continuamente su eficiencia (Doll y Vonderemse, 1991). Las organizaciones que persiguen estos objetivos deben enfatizar el desarrollo rápido de productos, así como los ciclos de fabricación y los plazos de entrega cortos (Tan, 2002).

Siguiendo esta tendencia, en los últimos años muchas empresas han hecho inversiones importantes en tecnologías avanzadas de fabricación. Entre ellas, una de las que ha recibido mayor impulso es el mecanizado de alta velocidad (Aspinwall et al., 2001). Las empresas han invertido en centros de mecanizado para alta velocidad esperando obtener una reducción sustancial en el tiempo de fabricación de las piezas, así como también una mejora en la calidad de los productos y una disminución de los costes de fabricación.

Sin embargo, las ventajas obtenidas de estas inversiones en tecnologías avanzadas han sido, en general, difíciles de valorar. Es más, parece ser que, en general, hay discrepancias entre las expectativas de las empresas y las metas conseguidas en realidad (Tan, 2002). En el caso del mecanizado de alta velocidad, aunque se ha hablado ampliamente de las mejoras en tiempo de fabricación y calidad del producto que produce, no existen datos publicados que corroboren esta afirmación (Dewes y Aspinwall, 1997).

Otro aspecto que no ha recibido la suficiente atención en el ámbito del mecanizado de alta velocidad es la implementación de la tecnología en la industria, basándose en un análisis total del proceso (Dagiloke et al., 1995). Existe una cierta tendencia a infravalorar los inconvenientes del HSM, como son la corta vida de la herramienta, el elevado coste de los cabezales y la necesidad de controles numéricos especiales. Además, en la mayoría de casos no es suficiente incorporar el centro de mecanizado de alta velocidad en el entorno productivo, sino que resulta necesario adaptarlo, incorporando, por ejemplo, un sistema CAD/CAM capaz de crear adecuadas estrategias para el HSM. Una correcta implantación del HSM suele requerir, además, de una reestructuración de la plantilla, puesto que son necesarias muchas más horas de programación CAM que en caso de otras tecnologías de fabricación, pero en cambio se requiere menos dedicación de operario a pie de máquina debido a la elevada automatización de los centros de mecanizado.

Por estas razones, la decisión de invertir en centros de mecanizado de alta velocidad debe responder a un análisis detallado, que tenga en cuenta los aspectos mencionados, desde un punto de vista económico, y que permita valorar, en función del tipo de productos a fabricar, la conveniencia de utilizar dicha tecnología en un determinado entorno de fabricación. El problema radica en la falta de datos disponibles para hacer esta valoración, puesto que se trata de una tecnología relativamente nueva y, por lo tanto, aun no se han llevado a cabo estudios de resultados obtenidos por las empresas al aplicarla.

Esta relativa falta de experiencia en la aplicación del mecanizado de alta velocidad conlleva cierta arbitrariedad por parte de las empresas cuando desean implantar esta tecnología. Por ejemplo, un primer paso para la implantación del HSM puede consistir en aplicar estrategias de mecanizado de alta velocidad en centros de mecanizado convencionales, equipándolos o no con cabezales de alta velocidad. Esta opción, que permite obtener resultados con una inversión moderada, no suele ser la escogida por la mayoría de empresas, que optan por adquirir un centro específico para HSM. Existe una amplísima oferta de máquinas-herramienta, centros de mecanizado y controles numéricos disponibles en el mercado, y todos ellos pueden tener muy diversas configuraciones, incorporando funciones adicionales, con aplicaciones muy diversas. Frente a tanta variedad, seleccionar la combinación centro de mecanizado – control numérico más adecuados para una determinada aplicación no es tarea fácil.

Las cuestiones a resolver son, pues, las siguientes: ¿cuál es el impacto del HSM después de su implantación? ¿Cómo repercute la implantación del HSM en los productos fabricados? ¿Mejora su calidad? ¿Se reduce el tiempo de fabricación? ¿Cómo se puede seleccionar el centro más adecuado según las necesidades?

1.3. Objetivos de la tesis

El principal objetivo de la tesis es desarrollar una metodología de selección de centros de mecanizado de alta velocidad. Dicha selección se realiza en base a criterios de productividad, así como en función de parámetros tecnológicos del producto a fabricar.

Teniendo en cuenta que la conveniencia de invertir en un determinado centro de mecanizado depende tanto de factores económicos como tecnológicos, es decir, depende de la inversión que la empresa esté

dispuesta a asumir, así como de los resultados esperados en la aplicación concreta, se lleva a cabo un estudio del impacto del mecanizado de alta velocidad desde dos perspectivas distintas:

1. Desde el punto de vista del producto: la calidad del producto, medida en términos de acabado superficial, precisión geométrica y precisión dimensional, variará en función de las características del centro de mecanizado y el control numérico. Esta parte del análisis consiste en valorar cómo afectan las distintas prestaciones de la máquina-herramienta a las características del producto acabado.
2. Desde el punto de vista de la empresa: la aplicación del mecanizado de alta velocidad en una empresa tiene consecuencias importantes, tanto de tipo organizativo como directamente en los resultados de la misma. Estas consecuencias están claramente vinculadas con el impacto del HSM en el producto, pues una empresa que consigue obtener productos de mayor calidad será más competitiva. El tiempo de fabricación es también un factor importante en relación a los resultados de la empresa, y tiene una clara dependencia de las características del centro de mecanizado que se utilice.

Así pues, el objetivo general anteriormente anunciado se concreta en los siguientes objetivos específicos:

- § Analizar qué variables del proceso de mecanizado tienen mayor influencia sobre el error dimensional de las piezas fabricadas y sobre el tiempo de ciclo.
- § Investigar experimentalmente el error dimensional de las piezas mecanizadas en función de las características de los centros de mecanizado y de los parámetros programados, haciendo especial énfasis en la velocidad de avance.
- § Investigar experimentalmente la variación del tiempo de ciclo en el mecanizado, en función de las variables tipo de interpolación, velocidad de avance y tipo de sistema de sujeción de herramienta.
- § A partir de los resultados obtenidos en estas investigaciones, elaborar una metodología de selección de máquinas herramienta, que tenga como variables de entrada las características de los productos y las necesidades de producción, y como resultado, los parámetros generales y aproximados del centro de mecanizado más adecuado a las necesidades de la empresa.

Los resultados obtenidos en esta tesis deberían servir como herramienta de ayuda a la toma de decisiones para empresas que se planteen la

implantación del Mecanizado de Alta Velocidad en su entorno productivo, puesto que les indicará los parámetros que deben analizar y les servirá como guía a la hora de decidir el centro de mecanizado que deben adquirir.

Actualmente, el mecanizado de alta velocidad ha conseguido ya una cierta madurez, tanto a nivel de conocimiento como a nivel de aplicación de la tecnología. Por lo tanto, es un buen momento para llevar a cabo un análisis de resultados de esta tecnología.

1.4. Metodología y ámbito de aplicación

La metodología seguida para la realización de esta tesis es la siguiente:

1. Análisis de la literatura y de los estudios realizados, tanto en el ámbito del mecanizado de alta velocidad como en el de la evaluación del impacto de tecnologías avanzadas de fabricación. Este análisis ha permitido el establecimiento de un marco teórico y la elaboración del estado del arte, así como también evaluar los resultados obtenidos en trabajos de investigación que abordan problemáticas más específicas entorno a la fabricación por arranque de viruta.
2. Análisis de las variables y parámetros de los centros de mecanizado de alta velocidad que tienen influencia sobre la precisión geométrica y dimensional de las piezas acabadas, así como sobre el tiempo de ciclo del mecanizado. Clasificación de dichas variables.
3. Experimentación, para determinar el tiempo de ciclo y el error dimensional en función de los parámetros escogidos en la fase anterior. Esta fase comprende las sub-fases siguientes:
 - a. Diseño del experimento, para determinar qué modelo es el más adecuado para el tipo de respuestas que se espera obtener y el número de variables de entrada. Otro aspecto importante del diseño de experimentos es el número de niveles que se estudiarán para cada variable, y el valor que se asigna a estos niveles.
 - b. Elaboración de un protocolo de experimentación, donde se describen las condiciones en que se llevarán a cabo las pruebas, así como la metodología seguida para minimizar el efecto de la variabilidad inherente al proceso.
 - c. Realización de las pruebas. Esta sub-fase comprende una primera serie de pruebas que permiten corroborar que los

valores asignados a los niveles de las diferentes variables son adecuados, así como poner a prueba el protocolo y, en su caso, mejorarlo. Una vez hechos los cambios que sean necesarios, se llevan a cabo las pruebas especificadas en el diseño de experimentos, y se miden las respuestas.

- d. Análisis de las respuestas, para la obtención de un modelo que define el tiempo de ciclo y el error dimensional en función de las variables especificadas.
4. Elaboración de la metodología de selección de máquinas-herramienta a partir de la información obtenida en la fase anterior.

El ámbito de aplicación de la tesis comprende la obtención de una metodología de selección de centros de mecanizado con las restricciones siguientes:

- § Se analiza únicamente el mecanizado del aluminio, por lo tanto la metodología obtenida tiene aplicación fundamentalmente en este caso.
- § Se analiza el caso del mecanizado de superficies esculpidas, que es habitual en el mecanizado de aluminio, tanto en el caso del sector del automóvil como en el del aeronáutico. También es una operación habitual en el sector de moldes y matricería.
- § El estudio se centra únicamente en operaciones de fresado, y por lo tanto únicamente incluye máquinas-herramienta del tipo centro de mecanizado.

1.5. Estructura de la tesis

La tesis que se presenta se estructura en ocho capítulos, cuyo título y contenido se describe a continuación:

Capítulo 1- Definición del tema de investigación: se expone el tema de investigación y se resume la metodología utilizada en el desarrollo del trabajo.

Capítulo 2- Introducción a la investigación: se definen los conceptos utilizados en la investigación, se resume el estado del arte y se justifica la unidad temática de la tesis.

Capítulos 3, 4, 5 y 6- Presentación de los trabajos: se exponen los artículos publicados con una breve presentación de cada uno de ellos al inicio de los capítulos.

Capítulo 7- Conclusiones y desarrollos futuros: comprende una síntesis de los principales resultados así como la discusión de los mismos, y plantea futuras líneas de investigación.

Capítulo 8- Referencias: se trata de un listado de bibliografía y artículos consultados, organizados alfabéticamente por autor.

Capítulo 2. Introducción a la investigación

La revolución experimentada por la tecnología de fabricación en los últimos años es absolutamente impresionante. La evolución de los ordenadores, de las nuevas tecnologías de comunicación, etc., ha revolucionado el mundo en general y en particular el mundo empresarial, en muchos aspectos, entre los cuales se encuentran, inevitablemente, las tecnologías de fabricación.

De todos los procesos de fabricación, aquellos que se basan en el arranque de viruta se encuentran entre los más utilizados, puesto que se trata de métodos muy flexibles que permiten trabajar una gran cantidad de materiales distintos, dándoles también una variedad de formas importante.

En el campo de la fabricación a través de arranque de viruta, uno de los cambios más importantes que se ha producido en la última década ha sido la fuerte introducción del Mecanizado de Alta Velocidad en las empresas del sector mecánico, puesto que, para muchos ámbitos industriales, la competitividad pasa inexorablemente por la adopción de dicha tecnología, que se inscribe en una tendencia permanente en la evolución del mecanizado.

De las muchas variables a tener en cuenta en el mecanizado, la velocidad de corte es la que tiene mayor influencia sobre la ratio de producción y sobre el acabado superficial de las piezas. Por este motivo hay un gran interés, tanto entre la comunidad de investigadores como en la industria, en la optimización de la velocidad de corte como un modo de obtener una mayor productividad (Dagiloke et al., 1995).

Los factores que han hecho posible esta evolución hacia la alta velocidad son diversos (Echapere y Esteban, 1999). Quizá entre los más importantes se encuentran el desarrollo de los materiales de la herramienta, el mejor conocimiento de los mecanismos de formación de la viruta y del desgaste de la herramienta, y finalmente el desarrollo de las máquinas-herramienta y el entorno de mecanizado (equipos de CAD/CAM, controles numéricos, etc.), aunque hay otros factores a tener en cuenta, como son:

- § El crecimiento constante de las demandas de eficiencia en tiempo y coste. Los clientes demandan cada vez más un *lead-time* lo más corto posible, y sin embargo esperan una calidad cada vez más alta y unos precios más bajos. Por lo tanto, el tiempo es un factor crítico (Alam et al., 2002).
- § El desarrollo de nuevos materiales de más difícil mecanización, que refuerza la necesidad de buscar soluciones innovadoras de mecanizado.
- § La demanda de una mayor calidad del producto como resultado de la dura competitividad existente. La sustitución del acabado manual constituye un claro ejemplo.
- § Las exigencias de menores tiempos productivos a través de menores preparaciones y flujos simplificados.
- § La reducción del ciclo de vida del producto.
- § El aumento de las superficies multifuncionales en los componentes.

El Mecanizado de Alta Velocidad es aún una tecnología joven que conduce, entre otras cosas, hacia un mejor dominio de la precisión y la calidad de los mecanizados.

Sin embargo, tal y como se expone a lo largo de este trabajo, el Mecanizado de Alta Velocidad no es simplemente una evolución del mecanizado tradicional, no consiste únicamente en mecanizar a una velocidad superior. Se trata de una tecnología claramente diferenciada, puesto que el comportamiento de los materiales, las herramientas y las máquinas-herramienta es sensiblemente distinto al correspondiente al mecanizado tradicional. Además, las operaciones se llevan a cabo con métodos y equipos de producción específicos (Pasko et al., 2002), y es necesario un determinado conocimiento que, aunque puede basarse en el mecanizado tradicional, requiere además otras habilidades y capacidades. De esta manera, la alta velocidad no es sólo una máquina más una herramienta más unas condiciones de corte, hace falta un *know-how* que puede basarse en un buen conocimiento de la naturaleza del fresado a alta velocidad (Padilla y López de Lacalle, 1999).

Se trata de una tecnología innovadora, que posibilita velocidades de corte entre 4 y 10 veces superiores a las correspondientes al mecanizado tradicional, con lo cual permite obtener grandes resultados en cuanto a la reducción de los costes (hasta un 60% según varios autores) y en los tiempos de fabricación: reducción de hasta un 25% en piezas unitarias y 40% en las pequeñas series (Bagard y Palleau, 1995). Pero esto no es todo: los procesos a alta velocidad consiguen en muchas ocasiones

acabados de superior calidad e, incluso, posibilitan la mecanización de formas y piezas que, por diversas razones, les están vedadas a las técnicas convencionales.

Sin embargo, hay aún muchos ámbitos en los que el Mecanizado de Alta Velocidad se desconoce. Y, por supuesto, queda mucho camino por recorrer, tanto por parte de los investigadores como también de los fabricantes de máquinas-herramienta, herramientas y controles numéricos.

Se puede considerar que con el HSM se ha dado un paso importante hacia el mecanizado óptimo de cada material. A medida que se van desarrollando y mejorando las máquinas, las herramientas, los programas de CAD-CAM, los CNC, etc., se va avanzando hacia la optimización general del mecanizado, en la que cada material tendrá sus óptimas condiciones de corte, sus estrategias, sus herramientas, etc. Esta situación se muestra en la *Figura 1*.

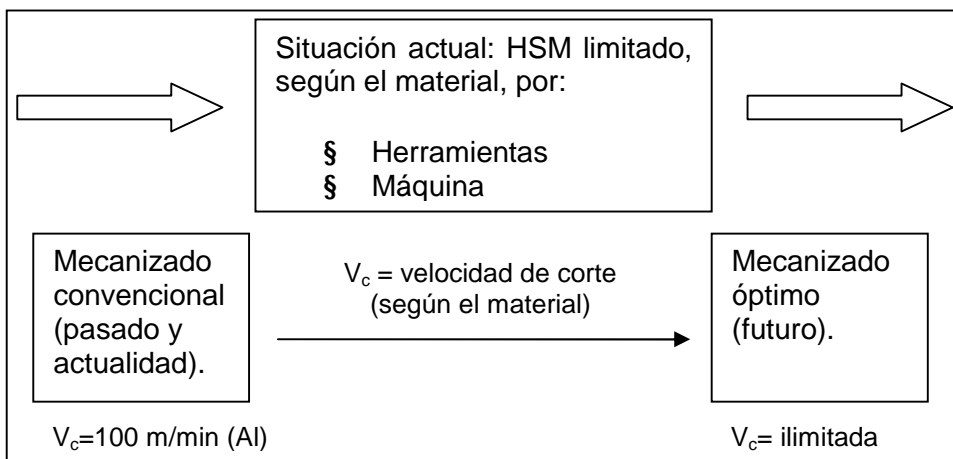


Figura 1. Evolución del HSM.

El Mecanizado de Alta Velocidad es actualmente una realidad en muchos ámbitos, y se aplica especialmente en el sector aeronáutico y automovilístico, así como también en la producción de moldes y matrices. También está teniendo una importancia creciente en la fabricación de piezas de aluminio, como por ejemplo componentes para la industria médica (*medical devices*) y para la fabricación de computadoras. En el sector del automóvil, el número de piezas fabricadas en aluminio está creciendo enormemente en los últimos años, de manera que incluso algunas marcas producen actualmente coches cuyas carrocerías se fabrican íntegramente en este material, y no solamente en su gama

superior. Este puede ser uno de los factores que ha impulsado el crecimiento del HSM en la última década.

El Mecanizado de Alta Velocidad tiene también fuertes competidores, el más importante seguramente es la electroerosión (*Electrical Discharge Machining*, EDM, en terminología anglosajona), que se utiliza de forma muy habitual en la fabricación de moldes y matrices, así como también el mecanizado tradicional, aunque este representa una competencia mucho menor. Precisamente algunas de las investigaciones que se llevan a cabo actualmente tienen como objetivo establecer en qué casos es más conveniente utilizar cada una de las tecnologías de fabricación, no solamente desde un punto de vista tecnológico sino también económico o empresarial.

Por otra parte, el camino que va desde la decisión de adoptar los procesos a alta velocidad en la empresa, hasta la obtención de la primera pieza, exige la realización de cambios importantes en la planta, además de una costosa inversión en maquinaria y software, así como la formación cualificada del personal implicado. Cualquiera que sea la especialidad, la fabricación mediante HSM, con el fin de aumentar la productividad industrial, implica unos requisitos que todo responsable de taller mecánico debe integrar obligatoriamente en sus planteamientos estratégicos. Un proyecto de Mecanizado de Alta Velocidad debe ser entendido, por tanto, como un proyecto global, como un proyecto de empresa en el que CAD/CAM, máquina, recursos humanos y organización recorren un mismo camino. Es precisamente a través de proyectos globales y estructurados como se facilita el cambio hacia una cadena de producción HSM con la eficacia y la rentabilidad pretendidas.

Consiguientemente, el reto que representa este cambio suele ser difícil de afrontar desde los recursos disponibles en las pequeñas y medianas empresas, absorbidas por las dificultades y problemas cotidianos de productividad, y actualmente es más habitual encontrar este tipo de maquinaria en grandes empresas, aunque cada vez más se detecta su incorporación en talleres más pequeños, puesto que su empleo por parte de los mecanizadores se traduce en un aumento importante de la flexibilidad (capacidad de mecanizar piezas diferentes), característica que es de gran importancia, precisamente, en las empresas más pequeñas.

2.1. Mecanizado de alta velocidad: fresado

2.1.1. Origen y evolución

La primera definición de Mecanizado de Alta Velocidad fue la propuesta por Carl Salomon en 1931, quien afirmaba que a una cierta velocidad de corte, entre 5 y 10 veces más alta que la convencional, la temperatura en la interfaz viruta-herramienta disminuía (Echapere et al., 1999; Pasko et al., 2002). Según Salomon, este hecho ofrecía la oportunidad de aumentar la productividad, mecanizando a elevadas velocidades de corte.

No es posible verificar esta teoría en su totalidad en base a los resultados experimentales recientes, sin embargo, sí que puede afirmarse que hay un decremento relativo de la temperatura en la viruta, que empieza a una determinada velocidad, diferente para cada material (Pasko et al., 2002). Esta disminución de temperatura sólo es significativa en el mecanizado de aleaciones ligeras (Echapere et al., 1999).

Siguiendo esta línea, otros investigadores como Kronenberg y Arndt continuaron trabajando en el campo del mecanizado de alta velocidad hasta los años 70, utilizando ensayos balísticos y alcanzando velocidades de hasta 13.500m/min (Echapere et al., 1999).

Superada esta fase, los ensayos modernos de HSM sobre máquinas-herramienta se han desarrollado en 3 etapas (Echapere et al., 1999):

- § Ensayos de torneado en los años 50 y 60 (Richter, Schiffer), con velocidades hasta 7.000m/min.
- § Ensayos de rectificado a alta velocidad en los años 60 y 70, con velocidades hasta 120m/s (Opitz, Peters)
- § Ensayos de fresado en los años 80-90 (King, Mc Gee, Schulz), con velocidades hasta 30.000m/min.

Desde finales de los años 70 y principios de los 80, la comunidad de investigadores en el campo del mecanizado ha sido especialmente activa en el área del Mecanizado de Alta Velocidad (Tung et al., 1994). Los primeros artículos publicados sobre este tema, firmados por los investigadores Kahles J.F., Field M. y Harvey S.M., aparecen alrededor de 1978 bajo los títulos "*High Speed Machining possibilities and Needs*" y "*High Speed Machining update*".

Los principales objetivos de las investigaciones en el mecanizado de alta velocidad pueden clasificarse en tres categorías (Schultz y Moriwaki, 1992):

- § La primera, en el primer estadio de la investigación, fue la brecha tecnológica de mecanizar aleaciones de titanio y acero. Esta investigación no tuvo éxito.
- § Otro objetivo importante fue la mejora en la calidad superficial y precisión de mecanizado, que tuvo éxito en algunos casos como en el mecanizado de aluminio.
- § Finalmente, otro objeto de la investigación ha sido el de conseguir mayor productividad.

Sin embargo, los intereses de los investigadores han ido cambiando a lo largo de los años. Una de las investigaciones más sistemáticas llevadas a cabo ha sido la correspondiente a un estudio llamado *4-year Advanced Machining Research and Technology (BMFT)*, que empezó en 1979 en Estados Unidos, con el objetivo de conseguir una base científica para el Mecanizado de Alta Velocidad y también para la utilización del láser.

A partir de los años 80, los estudios sobre la alta velocidad en Europa estaban encabezados principalmente por la Technische Universität de Darmstadt, con el profesor Scultz, y la Universidad de Aachen, con el profesor Koenig. Las necesidades en aquel momento llevaron a los investigadores a encaminarse hacia el desarrollo de nuevos materiales de corte, como CBN (nitruro de boro cúbico) y cerámicas, y a la mejora de las características estructurales y de control de las máquinas de alta velocidad (Padilla y López de Lacalle, 1999).

Las perspectivas del fresado a alta velocidad suscitaron en Francia un gran interés, de tal forma que se generó un consorcio de trabajo con las empresas Renault, Citroën, Aeroespacial, BMO, Dassault, Ascometal y Precise, y las escuelas ECL de Nantes, universidad de Metz y universidad de Toulon. Los resultados de este programa fueron impresionantes:

- § Mejora de la productividad en factores de 5 a 20.
- § Mejora del fresado de moldes.
- § Se comprobó que las máquinas-herramienta construidas hasta la fecha poseían una fuerte limitación en velocidad de rotación y potencia, que impedía sacar partido a las herramientas.

§ También se comprobó la necesidad de mejorar en la rapidez y precisión de los controles.

En los últimos años, las investigaciones entorno al mecanizado de alta velocidad se han centrado principalmente en conseguir un conocimiento profundo del proceso, que permita modelizarlo y predecir sus resultados, así como también en el desarrollo de las infraestructuras (máquinas-herramienta y herramientas) que permitieran un salto cualitativo importante de esta tecnología. La evolución del Mecanizado de Alta Velocidad hasta la situación actual ha pasado, pues, por muchos estadios, consiguiéndose un desarrollo muy destacable.

2.1.2. Características

El Mecanizado de Alta Velocidad es una tecnología de fabricación de arranque de viruta. Consiste en la utilización de mayores velocidades en el husillo y mayores valores de avance de los ejes para conseguir elevados porcentajes de eliminación de material sin degradar la precisión y la calidad de la pieza (Arnone, 2000).

Sin embargo, hay autores que consideran que la utilización de HSM no significa obligatoriamente mecanizar a altas revoluciones del husillo, ya que muchas de las aplicaciones se realizan con velocidades del husillo moderadas. Según Pasko et al. (2002), el HSM debería verse como un proceso en el que las operaciones se llevan a cabo con métodos y equipos de producción específicos. Cabe destacar, además, la utilización de técnicas distintas en lo que se refiere al posicionamiento relativo de pieza y herramienta y a las trayectorias que describe la segunda respecto a la primera.

El Mecanizado de Alta Velocidad también puede definirse como el conjunto de sistemas y productos de mecatrónica que operan a velocidades que desafían los actuales métodos o tecnologías. Según esta definición, lo que actualmente se considera mecanizado de alta velocidad puede convertirse en el futuro en mecanizado estándar (Watson, 1999). Una muestra de ello es la definición que propone J. Tlustý (1993): “Las palabras *alta velocidad* se refieren a la velocidad de corte y, principalmente, a la velocidad de rotación del husillo, sustancialmente más alta que la utilizada hace diez años y también que la que se utiliza aún de forma común en la práctica general.”

Otra definición de HSM es la que proponen Joseba Pérez Bilbatua, Goretti Alberdi y Patxi López, del Centro de Aplicaciones del Mecanizado de Alta Velocidad de Tekniker. Según ellos, el HSM consiste en la optimización del mecanizado con las posibilidades existentes, limitado por la pieza/material a mecanizar y las herramientas y máquinas (CAD/CAM-CNC) disponibles. Esto puede suponer mecanizar a velocidades de corte entre 5 y 10 veces superiores a las que se utilizan de manera convencional para cada material. De esta forma, puede considerarse que con el Mecanizado de Alta Velocidad se ha dado un paso importante hacia el mecanizado óptimo de cada material.

Ninguna de estas definiciones precisa qué velocidades corresponden a Mecanizado de Alta Velocidad. No hay, pues, una definición general de HSM. Esto es debido a que ésta depende del material, la operación, la herramienta, etc. Por lo tanto, la definición puede ser una u otra en función de la tecnología disponible. Típicamente, el Mecanizado de Alta Velocidad implica velocidades de corte por encima de 100m/min, avances por encima de 1m/min y velocidades del husillo mayores a 10.000r.p.m. (Schultz y Moriwaki, 1992; Ciurana et al., 2008).

Sin embargo, T. Altan y otros autores (1993) proponen considerar los siguientes valores: avances del orden de 15m/min, velocidades de corte de 700m/min y velocidades del husillo a partir de 20.000r.p.m.

Otros autores (Dagiloke et al., 1995) proponen una distinción entre tipos de mecanizado en función de cuál sea la velocidad de corte, tal y como se muestra en la *Tabla 1*.

| TIPO DE MECANIZADO | ABREVIATURA | VELOCIDAD DE CORTE (m/min) |
|----------------------------|-------------|----------------------------|
| Low speed machining | LSM | Entre 1 y 600 |
| High speed machining | HSM | Entre 600 y 1.800 |
| Very high speed machining | VHSM | Entre 1.800 y 18.000 |
| Ultra-high speed machining | UHSM | Entre 18.000 y 300.000 |

Tabla 1. Tipos de mecanizado según la velocidad de corte (Dagiloke et al., 1995)

Finalmente, hay otros factores que influyen a la hora de establecer el rango de definición del HSM, como son las diferentes tecnologías de mecanizado (muchas veces el límite queda establecido por la máquina), la herramienta de corte y sobre todo el material que se va a mecanizar (Jiménez et al., 2001). Los rangos correspondientes a diferentes tecnologías se establecen en el gráfico de la *Figura 2*.

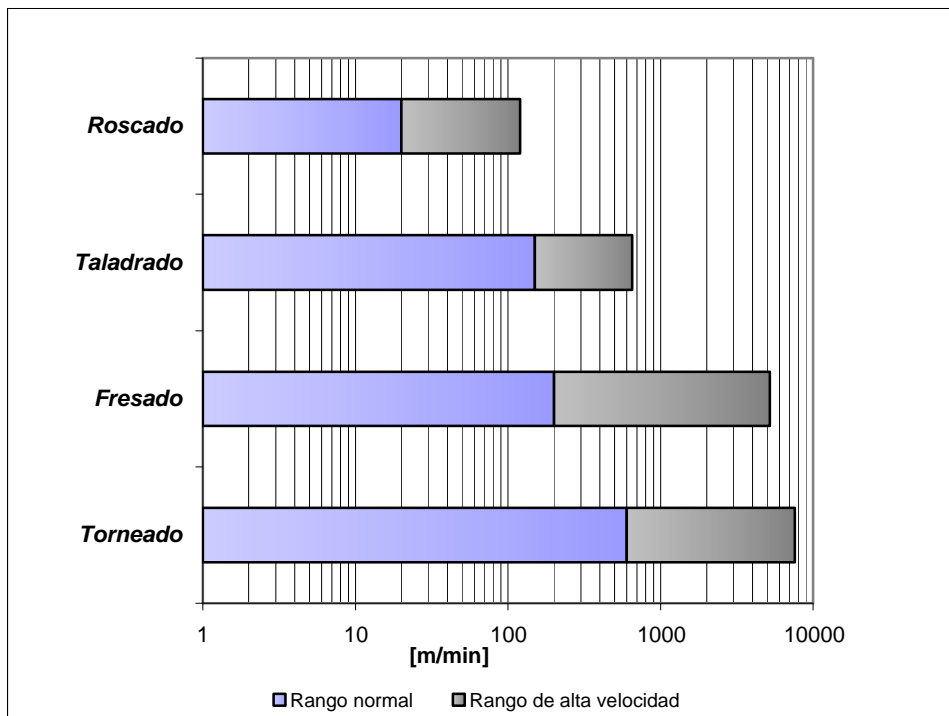


Figura 2. Rangos de velocidades de corte para mecanizados con altas velocidades. Fuente: Jiménez et.al. (2001).

Puede decirse también que el HSM no consiste simplemente en mecanizar a alta velocidad. Una de sus principales características es el hecho que se produce una deformación plástica con tensiones muy localizadas, lo que da lugar a gradientes de temperatura muy destacables ($100^{\circ}\text{C}/\text{mm}$) y aumentos de temperatura igualmente elevados, del orden de $105^{\circ}\text{C}/\text{s}$ (Campbell et al., 2006).

Actualmente el Mecanizado de Alta Velocidad es una tecnología de corte con bases sólidas que abre las puertas del mecanizado de materiales y figuras que antes no se podían mecanizar mediante el mecanizado convencional.

Las principales características del HSM son la buena calidad superficial de las superficies mecanizadas, los reducidos tiempos de mecanizado, la posibilidad de trabajar materiales templados y el hecho de que el calor del proceso se desaloja con las virutas en lugar de permanecer en la pieza (Maidagan, 1999). La herramienta y la pieza permanecen, por este motivo, frías al tacto.

Esta última característica se debe al hecho de que con el aumento de velocidad se da menos tiempo a la conducción del calor en la pieza, facilitando que éste se desaloje mediante la viruta (Dagiloke et al., 1995). Otra explicación al fenómeno la ofrecen Abukhshim et al. (2006), quienes afirman que la velocidad de corte tiene un efecto predominante en la temperatura de corte y en el mecanismo de transferencia de calor: al aumentar la velocidad de corte, el proceso de corte se hace más adiabático y el calor generado en la interfaz entre pieza y herramienta no puede ser conducido al resto de la pieza debido a que el tiempo de contacto es muy corto, por lo que se producen grandes aumentos de temperatura muy localizados en la viruta.

Es necesario mencionar también el concepto de mecanizado de alto rendimiento (en terminología anglosajona High Removal Rate Machining) y su relación con el mecanizado de alta velocidad. Tradicionalmente el mecanizado de alto rendimiento hacía referencia a un proceso en el que se aplicaban simultáneamente grandes avances y profundidades de corte, manteniendo las velocidades de corte consideradas convencionales. Este tipo de mecanizado, que da lugar a espesores de viruta muy grandes y, por tanto, a elevadas fuerzas de corte, sólo puede ser utilizado en materiales blandos debido al impacto que supone sobre las herramientas de mecanizado (López de Lacalle et al., 2004).

Actualmente, el concepto de mecanizado de alto rendimiento se ha generalizado, refiriéndose a toda tecnología de corte que mejore sustancialmente dos aspectos del proceso: la productividad, medida como tasa de arranque, y la calidad, en términos de precisión dimensional y rugosidad superficial. Así pues, hoy en día se entiende como Mecanizado de Alto Rendimiento todo aquél que supone una mejora notable respecto a la forma tradicional de mecanizar, aumentando el valor añadido del proceso (López de Lacalle et al., 2004). Según esta definición, pues, el mecanizado de alta velocidad supondría un caso específico englobado en el concepto más amplio de mecanizado de alto rendimiento.

Para llevar a cabo el mecanizado de alta velocidad es necesario un conocimiento detallado del proceso. Antes de empezar el trabajo, es necesario un análisis preciso de factores como la pieza, el material o la vida de la herramienta, las tolerancias permisibles y las características del proceso.

La estrategia básica para HSM consiste en ser capaz de seleccionar una velocidad de corte apropiada y una herramienta adecuada para una

pieza determinada, máquina-herramienta y sistema de mecanizado (Dagiloke et al., 1995).

Además, para hacer que los procesos de HSM sean suficientemente fiables, hace falta una programación juiciosa de los recorridos de la herramienta y de las condiciones de corte. A veces, el uso de velocidades más altas puede comportar que se produzcan más colisiones, más roturas del husillo, etc., con lo que se pierde mucho tiempo. Hay que asegurar que este tiempo perdido no sobrepase la ganancia obtenida por el uso de la alta velocidad (Ashley, 1995).

El HSM tiende a sustituir las pasadas de gran profundidad a baja velocidad de corte por muchas pasadas rápidas de menor profundidad de corte, ya sea axial o radial, obteniendo un considerable aumento de viruta desalojada (volumen de material por unidad de tiempo). Las altas velocidades de corte y los elevados avances disminuyen las fuerzas de corte gracias a espesores de viruta cada vez más pequeños.

La utilización de altas velocidades implica que en este proceso de fabricación se producen grandes aceleraciones y deceleraciones, mientras que las fuerzas de corte y el par aplicado son bajos. Estos fenómenos se traducen en unas cargas dinámicas muy altas (Arnone, 2000), e implican también que una porción significativa del movimiento de la herramienta se dedique a acelerar/decelerar entre puntos cercanos, con cambios de dirección bruscos (Rodríguez et al., 1999).

Además, aunque con el uso de HSM aumenta el ratio de material arrancado, hay estudios que demuestran que la potencia consumida también aumenta con la velocidad de corte, como el realizado por Dagiloke, Kaldos, Douglas y Mills en 1995.

La *Tabla 2*, elaborada a partir de Schultz y Moriwaki (1992), muestra qué características del Mecanizado de Alta Velocidad resultan de utilidad en cada área de aplicación.

Estas características del Mecanizado de Alta Velocidad tienen una influencia capital en las estructuras constructivas de las máquinas-herramienta, tanto en lo que se refiere al tamaño como también al diseño de sus elementos (sistema de transmisión, guías, husillo, etc.). Éste tema se tratará con más profundidad en apartados posteriores.

| CARACTERÍSTICAS | ÁREA DE APLICACIÓN | EJEMPLO |
|-----------------------------------|---|---|
| Altas velocidades | Metales ligeros | Aeronáutica y técnica aeroespacial |
| | Acero: hierro colado | Talleres de herramientas y matrices |
| Excelente acabado superficial | Mecanizado de precisión | Mecánica fina, sensores, óptica |
| | Piezas especiales | Compresores espirales |
| Bajas fuerzas de corte | Mecanizado de piezas con paredes finas | Aeronáutica, técnica aeroespacial, automóviles, electrodomésticos |
| Alta excitación dinámica | Mecanizado lejos de estados de resonancia en piezas complicadas | Piezas de precisión, sensores, óptica |
| Transporte de calor por la viruta | Ausencia de distorsión o de tensión residual | Piezas de precisión |
| | Ausencia de carga térmica en la pieza | Aplicable a piezas de magnesio |

Tabla 2. Características del Mecanizado de Alta Velocidad.

2.1.3. Aplicaciones: fresado

Tal como se ha mencionado en el apartado anterior, el uso del Mecanizado de Alta Velocidad permite reducir el tiempo de producción y aumentar la precisión de las piezas mecanizadas (Ashley, 1995). Además, el HSM también permite mejorar el acabado superficial de las piezas.

La incorporación de dicha tecnología en una empresa constituye un paso importante hacia el mecanizado en óptimas condiciones y la posibilidad de mecanizar algunos materiales a altas velocidades de corte y altos avances. Representa un cambio de filosofía, que se presenta desde dos vertientes diferentes: la primera es un cambio de mentalidad y distribución del tiempo, que se traduce en diferencias en el gasto de tiempo que deben ser asumidas, puesto que el tiempo dedicado al CAD/CAM es generalmente mayor que el correspondiente al mecanizado tradicional. Por este motivo se genera una mayor necesidad de personal en CAD/CAM y menor a pie de máquina.

La segunda vertiente es la modernización o cambio de las infraestructuras, la formación del operario, las herramientas, los controles y otros. Más específicamente, se requiere una máquina capaz de responder a las velocidades de mecanizado deseadas y al perfil objetivo de la pieza, un control numérico capaz de prever cómo va a cambiar la trayectoria exigida a esa herramienta en el instante de tiempo siguiente, un sistema CAD/CAM capaz de crear adecuadas estrategias para el HSM y herramientas resistentes al desgaste y adecuadas para la operación requerida. Con esta finalidad se aplican recubrimientos, que aumentan la vida de las herramientas.

El Mecanizado de Alta Velocidad se utiliza principalmente en tres sectores industriales, debido a sus requerimientos específicos (Pasko et al., 2002).

La primera categoría es la industria que trata el aluminio para producir componentes para automoción, pequeñas piezas para computadoras o dispositivos médicos. Esta industria necesita arranque de material rápido, porque el proceso tecnológico implica muchas operaciones. En los últimos años el número de componentes de aluminio a mecanizar ha aumentado de forma considerable. En el sector del automóvil, cada vez son más los componentes que se fabrican en aluminio, para reducir el peso total de los coches. Por otro lado, en el sector de los computadores, los componentes de aluminio se están sustituyendo por componentes de aleaciones de magnesio. También en la industria básica se utiliza el aluminio cada vez con más frecuencia. Los cuerpos de rotación de las bombas de vacío o las estaciones de repetición de telefonía móvil, por ejemplo, están fabricados en este material. Generalmente, este tipo de industria mecaniza aleaciones de fundición, muy abrasivas porque contienen silicio, partiendo de piezas muy cercanas a la forma final, por lo que se elimina poca cantidad de material.

La segunda categoría es la industria de la aviación, en la que se mecanizan piezas de aluminio de gran longitud, a menudo con paredes delgadas. Se trata de las llamadas aleaciones aeronáuticas, también denominadas maleables o de forja. Son aleaciones fácilmente mecanizables. La mayoría de las piezas de los fuselajes se fabrican mediante este proceso, eliminando gran cantidad de material, partiendo de un bloque inicial prismático. De forma habitual, en las estructuras de los aviones comerciales pueden encontrarse nervios de 50mm de altura y 5mm de grueso, que requieren ser mecanizados mediante HSM (Tlustý, 1993).

El tercer sector industrial es el de moldes y matrices, en el cual se requiere hacer el acabado de metales duros. En el caso concreto de España, este sector es el de más consumo de Mecanizado de Alta Velocidad. En este sector es importante mecanizar con alta velocidad y mantener una elevada precisión. Por lo tanto, HSM se usa para mecanizar:

- § Moldes para fundición: esta es un área en la que HSM puede utilizarse de forma productiva, ya que la mayoría de estos moldes están hechos de metales convencionales y tienen un tamaño moderado.
- § Matrices de forja en caliente y frío: la mayoría son adecuadas para HSM debido a sus formas complejas. La superficie es muy dura y a menudo propensa a las grietas. Además, en este sector se requieren piezas repetitivas, reduciendo por tanto el coste de CAM por pieza fabricada.
- § Moldes de inyección de plásticos o aluminio: también son adecuados para fabricarse mediante HSM, debido a su tamaño pequeño que hace que sea económico realizar todas las operaciones en una sola serie.
- § Fresado de electrodos en grafito y cobre: es un área excelente para el mecanizado de alta velocidad.
- § Modelado o fabricación de prototipos de moldes y matrices: es una de las primeras áreas de aplicación de HSM. Se utilizan metales fáciles de mecanizar. Las velocidades del husillo son habitualmente muy elevadas, y oscilan entre 15.000 y 50.000r.p.m., y los avances también son muy elevados.

Otra aplicación cada vez más habitual es el prototipado rápido (Schmitz et al., 2001). En este caso se trata de una técnica substractiva, en contraposición a otras técnicas utilizadas habitualmente para este fin, como la estereolitografía o el sinterizado láser. Se trata de una técnica más cara que las mencionadas, pero tiene la ventaja indiscutible de ofrecer prototipos metálicos funcionales, lo que no se consigue directamente con las otras.

En muchos casos, la aplicación del Mecanizado de Alta Velocidad puede derivar en una reducción de los tiempos de fabricación por la posibilidad de mecanizar directamente los bloques de acero templado, desde el desbaste hasta el acabado, y ahorrarse así los tratamientos térmicos intermedios. Estos procesos están siempre sujetos a condicionamientos económicos, pero si se consideran todos los factores involucrados, el resultado es a menudo muy ventajoso.

Sin embargo, cabe decir que el mecanizado del aluminio es la aplicación más común del mecanizado de alta velocidad y es el caso en el que el proceso es más cercano al concepto físico de alta velocidad (López de Lacalle et al., 2004). Aunque comercialmente se ha hecho uso y abuso del concepto “alta velocidad” aplicado a todos los materiales, cierto es que para algunos de ellos las velocidades en las que realmente se da un comportamiento distinto al convencional son inalcanzables para la mayoría de máquinas herramienta. La *Figura 3* presenta los rangos correspondientes a altas velocidades para distintos tipos de materiales.

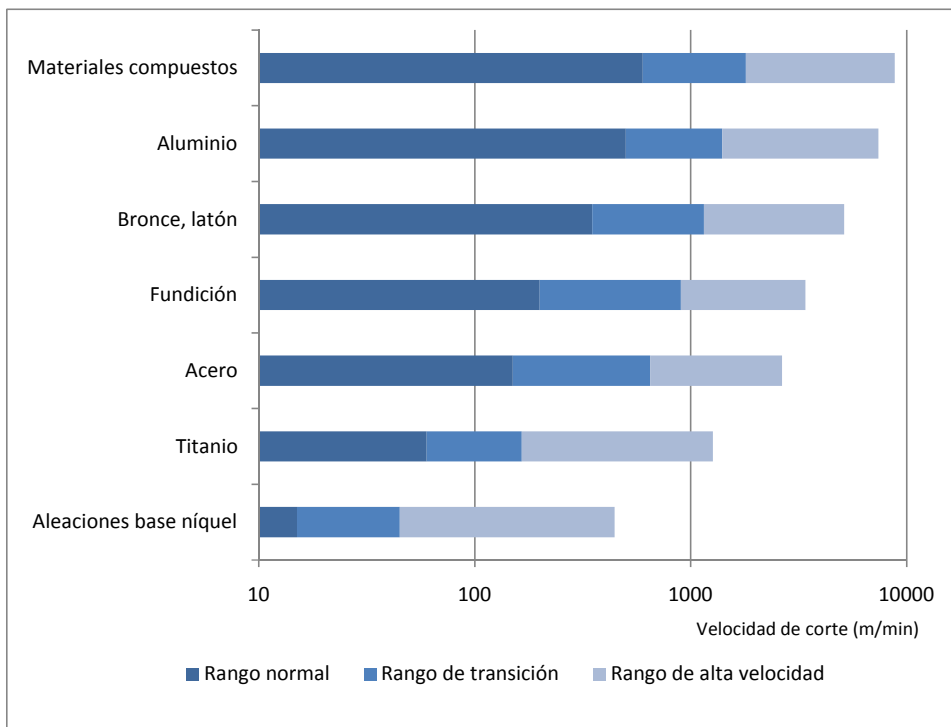


Figura 3. Rangos de velocidades de corte convencionales y de alta velocidad para distintos materiales. Fuente: adaptado de Schultz y Moriwaki (1992).

2.1.4. Análisis del mecanizado de alta velocidad frente a otras tecnologías de corte

Respecto al mecanizado tradicional, el mecanizado de alta velocidad presenta muchas semejanzas, puesto que ambos se basan en el arranque de material a través de una herramienta de corte. El principio que rige ambos procesos es, pues, el mismo, y de aquí deriva la similitud

existente entre las máquinas-herramienta y las herramientas para mecanizado tradicional y HSM.

Sin embargo, el hecho de realizar el proceso de arranque de viruta a una velocidad muy superior a la utilizada en el mecanizado tradicional, provoca un comportamiento distinto del material, la herramienta y todos los componentes que intervienen en la fabricación, tal y como se explica en el *Apartado 2.2*

El Mecanizado de Alta Velocidad puede tratarse como un proceso diferenciado del mecanizado tradicional sólo si por encima del campo de velocidades convencional puede observarse un comportamiento particular. Así pues, si el comportamiento de las herramientas en función de la velocidad respondiese a la ley de Taylor en cualquier intervalo de velocidades, no se podría hablar de HSM como un proceso diferenciado (Echapere y Esteban, 1999). La realidad muestra que dicho comportamiento varía con la velocidad, principalmente en los siguientes aspectos:

- § La distribución del calor.
- § La fricción entre herramienta y pieza.
- § La deformación del material .
- § Las fuerzas de corte.

Este último aspecto es especialmente importante porque exige que las máquinas-herramienta soporten cargas dinámicas muy altas. Más concretamente, en el Mecanizado de Alta Velocidad las aceleraciones y deceleraciones, el avance de los ejes y la velocidad del husillo son superiores a las correspondientes al mecanizado tradicional, mientras que, por el contrario, las fuerzas de corte y el par aplicado son inferiores (Arnone, 2000).

Las tecnologías de fresado tradicional y, en general, de arranque de viruta, se utilizan desde hace mucho más tiempo que el HSM, y tanto su enseñanza como su documentación son mejores, de ahí el gap existente entre la utilización de una y otra tecnología. Hay que tener en cuenta también que el HSM exige inversiones de dos a cinco veces las correspondientes al mecanizado convencional (Echapere y Esteban, 1999) y, aunque estas se compensan con reducciones de tiempo de fabricación y con mejores resultados de acabado, esta necesidad de inversión puede ser una barrera para la implantación del HSM en un determinado entorno de fabricación. Sin embargo, el arranque de

material ha recibido un nuevo impulso y ha ganado interés desde la introducción del Mecanizado de Alta Velocidad.

Para comparar el mecanizado tradicional con el de alta velocidad desde un punto de vista económico, hace falta tener en cuenta los costes de cada elemento que interviene en el proceso de fabricación: máquina-herramienta, utillajes, herramientas, etc. (Bagard y Palleau, 1995), puesto que, aunque el tiempo de fabricación se reduce, el aumento en el coste de los equipamientos puede hacer variar el resultado final.

Comparándolas con las máquinas-herramienta convencionales, la economía de aplicar una máquina de alta velocidad está muy influida por la elección de la tecnología de corte más adecuada, las velocidades y avances óptimos y la herramienta óptima. Esto significa que para cada material a mecanizar existe un rango de operación específico y relativamente pequeño, que depende de los parámetros de entrada de la máquina, la geometría y el material de la herramienta (Schultz y Moriwaki, 1992), de ahí la dificultad de implantación de esta tecnología.

Algunos estudios han permitido elaborar criterios para decidir en qué casos es preferible utilizar mecanizado convencional o de alta velocidad, teniendo en cuenta tanto las limitaciones técnicas como las recomendaciones que pueden estar relacionadas únicamente con parámetros económicos. Aun así, la elección es difícil y muchas veces viene determinada únicamente por un factor que obliga a utilizar la alta velocidad, como puede ser la dificultad de mecanización de determinados materiales mediante mecanizado tradicional o la necesidad de conseguir acabados de muy elevada calidad.

Contrariamente a lo que pueda parecer, el Mecanizado de Alta Velocidad no siempre supone una reducción del tiempo de mecanizado respecto al mecanizado tradicional. Cuando el material que se mecaniza es fácilmente mecanizable, como aluminio o cobre, el proceso mediante HSM es siempre significativamente más rápido, tanto en el desbaste como en el acabado, y por tanto muy ventajoso. Sin embargo, en el desbaste de grandes volúmenes de materiales difíciles de mecanizar, como acero o titanio, el mecanizado tradicional tiende a ser más rápido que el de alta velocidad. En el momento en que se limita la profundidad de pasada, tal como se produce en las operaciones de semi-acabado o acabado, el proceso de HSM vuelve a ser significativamente más rápido que el convencional.

A menudo se compara también el mecanizado de alta velocidad con la electroerosión. El EDM (*Electrical Discharge Machining*) o electroerosión

es una técnica de fabricación que permite mecanizar con precisión materiales que sean conductores (metales, aleaciones, grafito, cerámicas, etc.) independientemente de cuál sea su dureza. Se ha convertido en uno de los procesos de arranque de material no convencionales más utilizados en las industrias de moldes y matrices, automoción, aeroespacial y de equipamiento médico (Mandal, 2007), precisamente las mencionadas en apartados anteriores como usuarias más destacadas del mecanizado de alta velocidad.

Este proceso comenzó a utilizarse en 1954 para aplicaciones prácticas y desde entonces ha crecido hasta adoptar la posición de tecnología común y bien aceptada en los talleres de fabricación de herramientas y utillajes.

El proceso consiste en arrancar material por medio de una serie sucesiva de descargas eléctricas, separadas unas de otras un cierto tiempo, que saltan entre dos polos (electrodo o herramienta de trabajo y pieza a mecanizar). Las descargas son creadas por generadores de impulsos eléctricos.

El principio físico que rige la electroerosión es el siguiente: el mecanizado se efectúa mediante el salto de chispas eléctricas entre dos electrodos, sometidos a una determinada tensión eléctrica y sumergidos ambos en un líquido aislante, llamado líquido dieléctrico.

Al estar ambos electrodos en un medio dieléctrico o aislante, la tensión que se aplique a ambos ha de ser suficiente como para llegar a crear un campo eléctrico mayor que la rigidez dieléctrica del líquido. Bajo la acción de este campo eléctrico, iones libres positivos y electrones se encontrarán acelerados, creando un canal de descarga que se vuelve conductor, y es precisamente en este punto donde salta la chispa. Ello provoca colisiones entre los iones (de carga positiva) y los electrones (de carga negativa). Se forma entonces un canal de plasma.

Bajo el efecto de los choques se crean altas temperaturas en ambos polos y alrededor del canal de plasma se forma una bola de gas que empieza a crecer. Por otro lado, las altas temperaturas que se han dado en los dos polos, van fundiendo y vaporizando parte del material de la pieza, mientras que el electrodo apenas si se desgasta muy ligeramente.

En esta situación (bola de gas grande y material fundido en ambos polos), se corta la corriente eléctrica. El canal de plasma se derrumba y la chispa desaparece. El líquido dieléctrico entonces rompe la bola de gas haciéndola implosionar, es decir, explotar hacia adentro. Ello hace

que se creen fuerzas que hacen salir el material fundido, formando dos cráteres en las superficies. El material fundido se solidifica y es arrastrado en forma de bolas por el líquido dieléctrico, constituyendo lo que se puede llamar “viruta del proceso de electroerosión”.

El proceso aplica calor y presión. En consecuencia, es independiente de la fortaleza mecánica de la pieza. Esto permite el mecanizado de cualquier forma. Existen dos tipos básicos de procesos de electroerosión:

- § Electroerosión por penetración: la geometría se forma directamente por copia de un electrodo-herramienta.
- § Electroerosión por hilo: la geometría se forma indirectamente por un camino de herramienta programado.

El proceso de EDM permite, además, la superposición de geometrías.

Aunque el Mecanizado de Alta Velocidad y la electroerosión son procesos muy diferentes, existen algunas similitudes entre ellos:

- § Tienen aplicación en los mismos sectores industriales.
- § Ambos procesos se adaptan perfectamente al mecanizado de cavidades o perfiles relativamente poco profundos. Para este tipo de componentes, el HSM ha reemplazado al EDM e incluso al rectificado (Aspinwall et al., 2001).
- § Las tolerancias dimensionales que pueden obtenerse mediante uno u otro proceso son muy similares: HSM asegura una tolerancia dimensional de 0.02mm, mientras que la tolerancia utilizando ECM (método de mecanización electrolítica) es de 0.1-0.2mm y en EDM de 0.01-0.02mm (Pasko et.al., 2002).

Las diferencias más destacables entre el Mecanizado de Alta Velocidad y la Electroerosión son las siguientes:

- § EDM es mucho más lento que HSM (Alam et al., 2002; Maidagan, 1999), por lo tanto con la aplicación de HSM se reduce el tiempo de proceso.
- § HSM no es apropiado para cualquier tipo de molde, mientras que EDM sí lo es, incluso algunas cavidades de los moldes no pueden mecanizarse sin EDM (Alam et al., 2002).
- § Para cavidades profundas, componentes con esquinas interiores, algunos materiales difíciles de mecanizar y piezas que requieren un

acabado especial, es necesario utilizar EDM, puesto que HSM no permite este tipo de geometrías (Aspinwall et al., 2001).

- § La aplicación del Mecanizado de Alta Velocidad puede suponer ahorros importantes en cuanto a costo y tiempo de fabricación respecto al EDM, teniendo en cuenta que no hay costes de material y mecanizado de los electrodos, se elimina parcial o totalmente la electroerosión y hay una reducción del tiempo de pulido necesario (Arrazola et al., 1999).
- § En cuanto a los efectos de ambos procesos sobre las piezas, el EDM tiende a dejar tensiones residuales de tracción originadas en los ciclos térmicos de dilatación compresión, mientras que en el HSM las fuerzas de corte de empuje someten al material a ciclos de compresión y, como resultado, dejan tensiones residuales de compresión, que no son de excesivo valor (Arrazola et al., 1999).
- § En la fabricación de moldes, el hecho de reemplazar EDM por mecanizado hace que la durabilidad de éstos se incremente considerablemente (Pasko et al., 2002).
- § Desde el punto de vista medioambiental, el HSM prevalece sobre el EDM porque requiere un menor consumo de energía y porque el uso de lubricantes y refrigerantes está disminuyendo, acercándose cada vez más al mecanizado en seco (Krajnc y Kopac, 2004).

La *Tabla 3* resume las capacidades tecnológicas y de aplicación del Mecanizado de Alta Velocidad y la electroerosión por penetración. Resultan muy interesantes también las comparaciones técnica y económica que varios autores realizan entre el Mecanizado de Alta Velocidad y la electroerosión. Dichas comparaciones se recogen en la *Tabla 4* y la *Tabla 5*.

Tal como se ha mencionado anteriormente, una de las aplicaciones principales del Mecanizado de Alta Velocidad y de la electroerosión puede encontrarse en el sector de moldes y matrices. En la fabricación de moldes, muchas de las operaciones a llevar a cabo pueden realizarse mediante cualquiera de las dos tecnologías o incluso una combinación de ambas, pero la información disponible no permite a primera vista decidir qué opción es la mejor. Como regla general, en la industria del molde suele utilizarse el fresado de alta velocidad para el desbaste y el pre-acabado, mientras que el acabado puede realizarse mediante HSM o EDM, dependiendo de la geometría de la pieza, la disponibilidad de la maquinaria y la secuenciación. Además, EDM se usa para mecanizar cavidades estrechas y profundas a las que es difícil acceder mediante fresas. Sin embargo, bajo ciertas circunstancias, como por ejemplo cuando hay que evitar una nueva preparación de máquina (*set up*),

puede ser más efectivo desde el punto de vista del coste utilizar el fresado (Altan et.al., 1993).

| | MECANIZADO DE ALTA VELOCIDAD | ELECTROEROSIÓN |
|-----------------------|---|---|
| Características clave | Puede utilizarse en cualquier material que pueda cortarse | Puede utilizarse en cualquier material conductor. |
| | Permite una tasa de eliminación de material alta | No tiene límites geométricos |
| | Es preferido para formas abiertas y aerodinámicas | Trabaja con independencia de las propiedades mecánicas |
| | | Permite ciclos de mecanizado de fácil programación y ajuste |
| | Necesita de herramientas muy precisas y de ejes cortos y rígidos | Requiere de herramientas-electrodos perfectos y de una gestión de referencias |
| | Tiene límites con diámetros pequeños (velocidad de rotación del husillo y potencia) | Su economía depende fuertemente del coste de los electrodos |
| | Se puede conseguir directamente una superficie acabada. | Requiere un posterior mecanizado para conseguir la calidad superficial deseada. |
| Aplicaciones típicas | Grabados planos, aerodinámicos | Microgeometrías |
| | Herramientas de formas premoldeadas | Formas complejas, ranuras profundas |
| | Esquinas interiores redondas | Grabados profundos y rígidos; esquinas afiladas |
| | Mecanizado de bloques rígidos | Estructuras sensibles |
| | Mecanizado de cuerpos de automóvil o avión anchos | Piezas con materiales múltiples |
| | | Erosión multicavidad o multicanal |

Tabla 3. Características y aplicación de HSM y EDM. Fuente: adaptado de Krajnc y Kopac (2004).

| REQUERIMIENTOS DEL PROCESO | | |
|----------------------------|---|--|
| ÁREA | MECANIZADO DE ALTA VELOCIDAD | ELECTROEROSIÓN |
| Supervisión del proceso | Comprobar colisiones con formas exteriores | Proceso autocontrolado y programado |
| | Comprobar colisiones con elementos de fijación | |
| | Comprobar fuerzas de corte y tiempo de vida de las herramientas | Restablecimiento adaptativo de proceso deteriorado |
| | Comprobar continuamente rotura de herramienta | |
| | Comprobar velocidad de arranque | Larga autonomía de funcionamiento desatendido |
| Equipamiento | Se necesita maquinaria dedicada: | Equipamiento estándar: |
| | Velocidades de husillo y de guías hasta 5-8 veces superiores | Piezas a mecanizar extremadamente grandes |
| | Dispositivos actuadores dinámicos especializados ("drives") | Los controles CNC necesitan características especiales |
| | Rigidez; baja respuesta dinámica | Ajustes tecnológicos por medio de diálogos |
| | Herramientas equilibradas | |
| | Datos de maquinabilidad requeridos para cada material | Juegos de ajustes memorizados (herramienta, trabajo, geometría) |
| | Controles CNC multiejes de alta velocidad | Datos de maquinabilidad necesarios únicamente para familias de materiales (aceros, carburos de tungsteno, ...) |
| | Programación con <i>splines</i> y <i>NURBS</i> | |
| Planificación del trabajo | Programación compleja anticipativa | Programación organizada de trabajo/geometría/tecnología |
| | Búsqueda de la posición óptima de los filos de herramienta | Definición problemática de la limpieza con chorro dieléctrico (flushing) |
| | Sincronización multiejes intensiva en tiempo | Los movimientos superpuestos dificultan el control |
| | Comprobaciones de control de colisiones | Gestión de los electrodos-herramienta |

Tabla 4. Comparación técnica entre HSM y EDM.

| ASPECTOS ECONÓMICOS Y ORGANIZATIVOS | | |
|--|--|--|
| ÁREA | MECANIZADO DE ALTA VELOCIDAD | ELECTROEROSIÓN |
| Personal | Excelente <i>know-how</i> en fresado a partir de aprendizaje | El <i>know-how</i> en electroerosión normalmente es débil |
| Carga de los equipos | La combinación de mecanizado de alta velocidad y de baja velocidad es fácilmente aplicable | Cada material y geometría son erosionables. Hay gran libertad de movimiento |
| | Pueden conseguirse excelentes cargas de trabajo | Excelentes cargas de trabajo |
| | Una sola preparación para conseguir la pieza acabada | Es posible combinar la tecnología con el HSM para cada acabado |
| | | Una sola preparación también para algunas geometrías |
| Longitud de la cadena de proceso | Complejo a causa de las limitaciones geométricas | Procedimiento en forma de diálogo preorganizado |
| | Utillajes especiales, comprobaciones de colisión | No son necesarias las comprobaciones de colisión |
| | Tiempo de vida de las herramientas limitado | Pueden conseguirse todas las geometrías con movimientos cinemáticos simples |
| | Programación en 6 ejes para alcanzar geometrías complejas | Se requieren electrodos; en ocasiones varios de ellos, con una planificación y fabricación separadas |
| | Faltan datos de maquinabilidad para muchas aleaciones | |
| | | |

Tabla 5. Comparación económica entre HSM y EDM.

Cabe destacar que cada proceso tiene sentido en diferentes situaciones. Se recomienda utilizar la electroerosión en los siguientes casos (Zelinski, 2000):

- § Para esquinas interiores puntiagudas.
- § Para geometrías muy complejas, o donde es difícil llegar con una herramienta de corte.
- § En ranuras profundas. Específicamente, evitar el mecanizado cuando el ratio L:D (longitud de la herramienta respecto al diámetro) es particularmente alto.
- § En procesos no seguidos por ningún operario, puesto que EDM es el proceso más fácil de automatizar.
- § En piezas que requieran mucha pericia, puesto que el tiempo de programación para EDM es más corto que para HSM.
- § Cuando se especifica el acabado utilizando electroerosión.

Sin embargo, se recomienda utilizar mecanizado de alta velocidad en los supuestos siguientes:

- § Para superficies que requieran textura. En este caso, fabricar mediante EDM supondría añadir un paso más.
- § Cuando el acceso es fácil o la geometría abierta.
- § Para familias de piezas. Los grupos de piezas similares permiten amortizar el tiempo dedicado a la programación.
- § Cuando se requiere mucha precisión.
- § Cuando la disponibilidad del personal lo aconseja.

En general, puede afirmarse que ambas tecnologías muestran en el mercado todavía una gran capacidad de innovación y progreso. Así pues, es necesario mantenerse informado continuamente sobre las nuevas tendencias y desarrollos, y hacer una comparación cuidadosa antes de cualquier inversión a largo plazo.

De momento, ambas tecnologías seguirán compitiendo y siendo utilizadas en el mecanizado de moldes y matrices, conviviendo con la tecnología del mecanizado por láser, aplicada también al mecanizado de pequeñas cavidades con dimensiones precisas (Altan et.al, 1993).

La *Tabla 6* compara los tres procesos relacionados (mecanizado tradicional, mecanizado de alta velocidad y electroerosión) en función de distintos parámetros.

| PROCESO | VERSATILIDAD | M.R.R. (MATERIAL REMOVAL RATE) | ACABADO SUPERFICIAL | PRECISIÓN DIMENSIONAL | RAPIDEZ | GRADO DE UTILIZACIÓN | FACILIDAD DE INTEGRACIÓN CON EL ENTORNO DE FABRICACIÓN | FACILIDAD DE AUTOMATIZACIÓN Y PROGRAMACIÓN |
|------------------------------|---|--------------------------------|--|-------------------------|---|--|---|--|
| Mecanizado convencional | Muy alta, tanto en lo que se refiere a los materiales como a las geometrías | Medio | En general, $Ra \approx 3\mu m$ | Como máximo 0.05mm | Para materiales fáciles de mecanizar es más lento que HSM, pero no se puede afirmar lo mismo para los materiales duros. | Muy elevado, y en empresas de distinta dimensión | Actualmente existen muchos paquetes integrados, aunque presentan limitaciones | Hay un buen conocimiento por ser una tecnología conocida |
| Mecanizado de alta velocidad | Alta en lo que se refiere a los materiales, limitaciones en las geometrías | Alto | Hasta $Ra = 0.1\mu m$ (Dewes y Aspinwall, 1997) | Hasta 0.02mm | Muy alta en materiales fáciles de mecanizar, pero en materiales muy duros no presenta una ventaja clara. | Actualmente es más habitual en empresas grandes (porque se requiere una inversión elevada) | Empiezan a aparecer módulos específicos | Programación difícil |
| Electroerosión | Sólo para materiales conductores, pero mucha versatilidad en cuanto a las geometrías. | Bajo | Se suele utilizar el pulido manual. $Ra \approx 0.4\mu m$ (Alam, 2002) | Hasta $0.01 \pm 0.02mm$ | Muy lento | Muy extendido, pero en pocos sectores. | Actualmente existen algunos módulos específicos. | Gran facilidad de automatización |

Tabla 6. Comparación de mecanizado tradicional, de alta velocidad y electroerosión.

2.2. Equipos necesarios para el fresado de alta velocidad

2.2.1. Máquinas-herramienta

Las máquinas-herramienta de alta velocidad son sistemas complejos que pueden ser considerados el resultado de la optimización de todos los componentes y el equilibrio de requerimientos contrapuestos, como masas reducidas, bajos momentos de inercia, elevada rigidez estructural y baja sensibilidad a las variaciones térmicas (Repetto, 2002).

En el diseño de las máquinas-herramienta en general, y muy especialmente en las máquinas herramienta para alta velocidad, hay que tener muy en cuenta la fiabilidad, puesto que un pequeño fallo puede comprometer piezas de muy elevado coste.

Aunque hay diferentes tipos de máquinas-herramienta para HSM, de acuerdo con la optimización de las velocidades de corte y avances, puede decirse que no existe ninguna clase de máquina de alta velocidad que sea óptima para todas las aplicaciones (Schultz, 1989).

La máquina debe ser un elemento capaz de trabajar a alta velocidad y, para ello, debe:

- § Alcanzar una elevada rotación del husillo para conseguir altas velocidades de corte.
- § Moverse rápidamente gracias a motores lineales, con elevados factores de avance y aceleración en los ejes x-y-z.
- § Procesar inmediatamente los datos en el control numérico y volcarlos rápidamente en la memoria del sistema para poder calcular con precisión una trayectoria.
- § Absorber las fuerzas generadas en las operaciones de corte mediante una sólida construcción y mantener la precisión con los elevados parámetros de aceleración y desaceleración generados, controlando que la máquina se mantenga dentro de unas estrechas franjas de tolerancia.
- § Ofrecer un carenado complejo que garantice la seguridad de los operarios.

La estructura básica de la máquina-herramienta se muestra en la *Figura 4*.

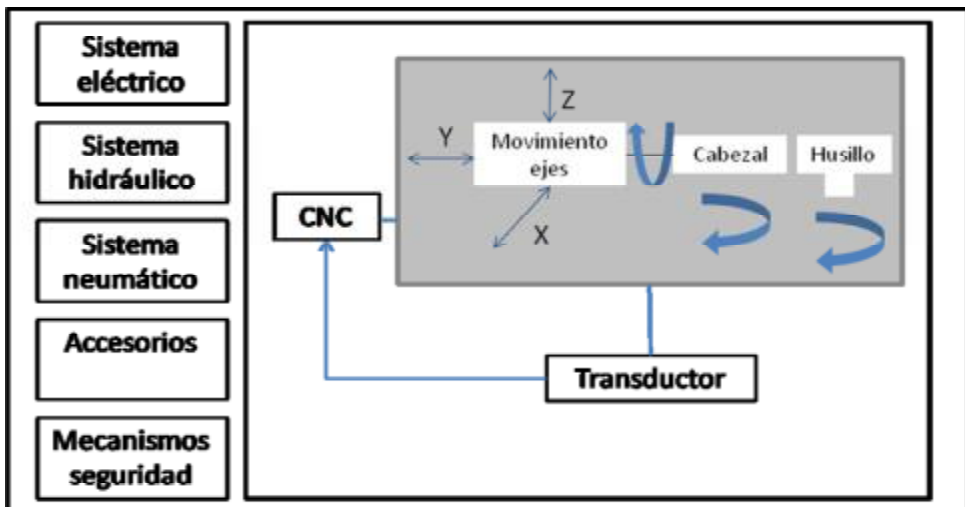


Figura 4. Estructura básica de las máquinas-herramienta para Mecanizado de Alta Velocidad. Fuente: adaptado de Repetto, 2002.

Los componentes básicos de las máquinas-herramienta para alta velocidad son los siguientes (Schultz y Moriwaki, 1992):

- § La base de la máquina: para obtener una correcta actuación dinámica, la base suele hacerse con hormigón sin polímeros.
- § El husillo principal de alta frecuencia: es el componente más importante. El motor de frecuencia regulada se sitúa siempre entre cojinetes.
- § Carros: todos los componentes móviles deben fabricarse en materiales ligeros, usando si procede nuevos materiales. En comparación con las construcciones convencionales, se pueden conseguir reducciones de masa de hasta el 40%. Esta reducción puede conseguirse mediante:
 - Selección de materiales de construcción adecuados
 - Construcción específicamente de bajo peso
 - Optimización del dimensionado geométrico utilizando un programa de elementos finitos
 - Investigación de los efectos en los componentes de la máquina colindantes.
- § Guías: mayoritariamente se usan guías antifricción con rodamientos de bolas.

- § Accionamiento del avance: se pueden conseguir avances altos (por encima de 100m/min).
- § Control Numérico Computerizado (en adelante CNC): debido a la alta velocidad de avance, a los CNC se les piden unos requerimientos extremos. Los CNC que se utilizan en el mecanizado convencional no son suficientemente rápidos para el Mecanizado de Alta Velocidad, puesto que el tiempo de procesamiento de una sentencia es superior al tiempo que se supone que debe invertir en ejecutarla. La solución reside en la utilización de funciones específicas, de las que se hablará con más detalle en el *Apartado 2.2.4*.
- § Evacuación de viruta y sistemas de refrigeración: la alta producción de viruta por unidad de tiempo exige mucho a los sistemas de evacuación de viruta. Por lo tanto, se recomienda colocar la pieza verticalmente. Los *spray* refrigerantes de alta presión asisten en el arranque de viruta.
- § Los dispositivos de seguridad: la elevada producción de viruta, las virutas que salen catapultadas y el uso de los *spray* refrigerantes hacen que sea necesario encapsular el espacio de trabajo. Las precauciones de seguridad para la rotura de la herramienta tienen absoluta prioridad. La pared de la cabina debe ser capaz de absorber, sin romperse, la energía de una pieza que sale disparada. Además de estos sistemas, debe haber también sistemas de control activos que garanticen una operación perfecta, puesto que el operador no puede interferir en los procesos de HSM.

Debido a las diferencias existentes entre el mecanizado tradicional y el de alta velocidad, las cargas dinámicas que se producen sobre las máquinas-herramienta para el HSM son muy superiores a las correspondientes al mecanizado tradicional. Esta característica del HSM tiene grandes implicaciones para el diseño de máquinas-herramienta, tanto en sus elementos fijos como en los móviles.

En lo que se refiere a los elementos fijos, son preferibles las máquinas de gran tamaño, puesto que son más rígidas, tienen una capacidad superior para acelerar y desacelerar rápidamente y tienen mejor comportamiento térmico (Arnone, 2000). Además, en la construcción de este tipo de máquinas-herramienta deben evitarse los voladizos, puesto que suponen una disminución de la rigidez. Se recomienda que en el diseño de las máquinas se elijan guías anchas y que el espacio entre ellas sea el mayor posible, además de evitar la superposición de ejes. Otro aspecto a considerar en el diseño de las máquinas-herramienta para Mecanizado de Alta Velocidad es que los errores angulares aumentan con la distancia, por lo cual es importante minimizar la distancia existente entre

los ejes de movimiento de la máquina y la superficie de contacto entre pieza y herramienta.

En lo que concierne a los elementos móviles, cabe decir que una máquina de alta velocidad requiere un cabezal y unos accionamientos de altas velocidades. Los accionamientos de alta velocidad necesitan también alta aceleración y, simultáneamente, alta dinámica. El peso de las partes móviles debe minimizarse. Lo más aconsejable es distribuir equitativamente las cargas entre el movimiento de la pieza y el del cabezal, y por esto la configuración más aconsejable es asignar uno de los desplazamientos a la mesa que soporta la pieza y los otros dos al cabezal (Almandoz, 1999).

Hay dos aspectos que tienen especial relevancia en el diseño de las máquinas-herramienta de alta velocidad, y que pueden tener efectos destacables sobre los resultados del proceso de mecanizado: se trata de la estructura de la máquina y de los sistemas de guías que permiten el movimiento de las partes móviles de la máquina. Dada esta importancia, se ha considerado interesante profundizar en estos dos aspectos en los siguientes subapartados.

2.2.1.a. *Estructura*

Hay diferentes estructuras posibles para las máquinas herramienta de alta velocidad, las principales son:

- § Columna fija tipo C
- § Columna móvil tipo C
- § Puente móvil
- § Puente fijo
- § Columna fija o móvil, con caña.

Cada una de estas estructuras presenta ventajas e inconvenientes sobre las demás, por lo cual no puede decirse de forma general que una sea mejor que las otras, sino que hay que buscar la más adecuada para cada aplicación.

En general, puede afirmarse que los centros de mecanizado de disposición horizontal son más adecuados para la automatización con palets. Sin embargo, estos centros son utilizados principalmente en

grandes volúmenes de producción. Se encuentran en el mercado con avances de hasta 60m/min y velocidades del husillo de hasta 15.000rpm. Los centros verticales son adecuados para la producción de moldes y matrices. Tienen capacidad para mecanizar con avances de hasta 60m/min y velocidades del husillo de hasta 24.000r.p.m. (Monreal y Rodríguez, 2003).

La *Tabla 7* resume las principales ventajas e inconvenientes de cada tipo de estructura. Algunas de las características mencionadas no son exclusivas del Mecanizado de Alta Velocidad, sino que son las mismas en el caso del mecanizado tradicional.

| VENTAJAS | INCONVENIENTES |
|---|--|
| Estructura de columna fija tipo C | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Ideal para piezas como cavidades de moldes, piezas planas, electrodos y otras piezas en que las dimensiones según el eje X o Y son superiores a la altura. • Precisión geométrica excelente porque las distancias entre los sistemas de guía y la superficie de contacto entre la herramienta y la pieza son relativamente pequeñas. • Acceso aceptable para el operario, pero no tan bueno como con otras configuraciones. • Comportamiento dinámico excelente • Buena relación coste-resultados • Tiempo de cambio de herramienta potencialmente rápido. • Después del cambio de herramienta, la máquina vuelve a la pieza de trabajo con una repetibilidad muy alta. | <ul style="list-style-type: none"> • Disminuye la rigidez cuando aumenta la altura. • Los cambiadores de herramienta son caros. • No es una estructura adecuada para piezas de muy grandes dimensiones. • Para piezas muy pequeñas se producen errores angulares adicionales porque la superficie de contacto entre la herramienta y la pieza se encuentra lejos de los ejes X e Y. • Estabilidad térmica mediana, a causa de la construcción asimétrica del montaje del eje Z. |
| Estructura de columna móvil tipo C | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Adecuada para un volumen de producción elevado. • Adecuada para piezas grandes y pesadas. • Excelente acceso del operario • Adecuada para piezas prismáticas como bases de moldes y ciertas estampas para paneles del sector del automóvil, con tolerancias superiores | <ul style="list-style-type: none"> • La rigidez y la precisión disminuyen respecto a la configuración anterior. • Para piezas medianas y pequeñas, el coste de fabricación es alto. • La repetibilidad por cambio de herramienta es baja si el carrusel se monta al final del eje X. |

| | |
|---|--|
| <p>a ± 0.015mm.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Adecuada para piezas largas y delgadas. • Para piezas grandes, la relación coste-resultado es mejor que con otras configuraciones. • El cambio de herramientas es preciso si estas se transportan por medio de la columna. | |
| Estructura de puente móvil | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Buena estabilidad térmica. • Rendimiento dinámico bueno. • Estructura adecuada para piezas grandes. | <ul style="list-style-type: none"> • Los efectos de los errores angulares son grandes. • Se reduce la rigidez y la precisión geométrica cuando se trabaja cerca de la mesa. • Cambio automático de herramienta muy caro. |
| Estructura de puente fijo | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Estabilidad térmica excelente. • Comportamiento dinámico excelente. • Para piezas grandes, es mejor que la estructura de columna fija tipo C. | <ul style="list-style-type: none"> • Cuando se aplica a piezas pequeñas, es menos preciso en cuanto a geometría que la estructura de columna fija tipo C. • Rendimiento limitado. |
| Columna fija o móvil, con caña¹ | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Acceso del operario excelente. • Cambio automático de la pieza fácil de sujetar. | <ul style="list-style-type: none"> • Rendimiento dinámico reducido. • Estabilidad térmica limitada. • El cambio de herramienta automático necesita, como mínimo, dos movimientos de ejes, lo cual la hace menos adecuada para mecanizado de altas prestaciones. |

Tabla 7. Análisis de las distintas estructuras de máquinas-herramienta para HSM.

¹ La estructura de columna fija con caña es más rígida y geoméricamente más precisa que la de columna móvil, pero menos precisa y rígida comparada con la estructura C de columna fija.

2.2.1.b. Sistemas de guías

Otro aspecto importante de las máquinas herramienta, a parte de la estructura, son los sistemas de guías. Según Arnone (2000), los más usuales son:

§ Guías hidrodinámicas:

- Son guías planas o en uve rectificadas.
- Son adecuadas para máquinas que no suelen cambiar de sentido.
- Son problemáticas en los centros de mecanizado.

§ Guías de rodadura:

- Están formadas por elementos giratorios.
- Es conveniente montarlas en máquinas de estructura muy rígida.
- Para centros de mecanizado de altas prestaciones se recomiendan guías lineales de rodillos tipo barril.
- No son recomendables para el mecanizado de altas prestaciones cuando se requiere un contorno 3D a alta velocidad.

§ Guías hidrostáticas:

- Es una tecnología que actualmente casi no se aplica, pero que puede tener mucha importancia en el futuro.

La *Tabla 8* permite comparar las propiedades de los tipos de sistemas de guías más habituales.

| CARACTERÍSTICA | TIPO DE GUÍA | | | |
|------------------------------------|----------------|------------------|---------------------|--------------|
| | HIDRO-DINÁMICA | GUÍA LINEAL BOLA | GUÍA LINEAL RODILLO | HIDROSTÁTICA |
| Rigidez | Baja | Media | Alta | Alta |
| Precisión geométrica | Media | Alta | Alta | Muy alta |
| Rozamiento | Alta | Baja | Baja | Casi cero |
| Amortiguación | Alta | Baja | Baja | Muy alta |
| Coste | Media | Baja | Media | Alta |
| Requisitos de mantenimiento | Media | Baja | Baja | Media-Alta |
| Vida | Alta | Media | Media | Alta |

Tabla 8. Comparación de los distintos tipos de guías. Fuente: Arnone (2000).

2.2.2. Herramientas

En el Mecanizado de Alta Velocidad se puede decir que la herramienta es un factor clave. El HSM no existiría si no se dispusiera de herramientas capaces de soportar las nuevas condiciones de mecanizado, en especial las elevadas temperaturas de oxidación. El desgaste y los altos costes de las herramientas suponen actualmente una limitación en el mecanizado, limitación que va decreciendo poco a poco. Las características de la herramienta de corte utilizada para un determinado proceso influirán sobre la calidad de la pieza final. Existe una gran variedad de herramientas en cuanto a forma, tamaño, número de filos, recubrimiento superficial, fabricante, etc. (Quintana et al., 2008). Por este motivo, la selección de la herramienta óptima para un determinado proceso de mecanizado de alta velocidad no es una tarea sencilla. Según Schultz y Moriwaki (1992), los campos clave en una herramienta para alta velocidad son los siguientes:

- § Material: lo esencial para escoger el material es conocer los mecanismos de desgaste. Mientras que la abrasión es el factor dominante en el mecanizado tradicional, en el de alta velocidad queda en último término. Debido a las altas temperaturas que se producen con el aumento de velocidad, se produce desgaste por difusión entre la pieza y la herramienta.
- § Geometría de la arista de corte: debe optimizarse para conseguir una vida de la herramienta suficiente y unas fuerzas de corte bajas.
- § Diseño: en la mayoría de los casos las herramientas corrientes no son suficientemente seguras. Las directivas básicas de diseño son:
 - Utilizar materiales dúctiles.
 - Minimizar el efecto de muesca dependiente del espacio de viruta necesario.
 - Minimizar el efecto de muesca dependiente del diseño de la arista de corte.
 - Mantener masas bajas para todos los componentes de las herramientas.
 - Disponer el centro de masas en un radio pequeño.

Seleccionar el material de corte adecuado para una aplicación de mecanizado específica puede dar lugar a una serie de ventajas considerables, entre las que principalmente se encuentra un aumento de la productividad, una mejor calidad y la reducción de costes. El incremento de la productividad se puede conseguir mediante un

incremento en la velocidad de corte o en la velocidad de avance. El aumento de estas velocidades está limitado por el material de la herramienta y por la máquina utilizada, sin olvidar que la velocidad se puede ajustar de tal forma que incremente la duración de la herramienta (Jiménez et al., 2001).

Cada material tiene propiedades que lo hacen adecuado para una determinada aplicación. Dentro de los factores que afectan a la selección de un material para herramienta de corte, se encuentran los siguientes:

- § Dureza del material de corte.
- § Aplicación donde se vaya a emplear.
- § Stock de reposición.
- § Requerimientos de exactitud y acabado.
- § Tipo de máquina-herramienta empleada.
- § Rigidez de la herramienta y el mango.
- § Requerimientos de producción dependientes de las velocidades de corte y avance.
- § Condiciones de operación tales como el esfuerzo de corte, temperaturas, etc.
- § Costes por pieza.

Los materiales más comunes para herramientas de corte son los aceros rápidos, aleaciones base cobalto, metal duro, cermets y cerámicos. Los distintos materiales varían mucho en cuanto a su resistencia al desgaste y en cuanto a su tenacidad. En los últimos años, los materiales que han ganado mayor importancia son el diamante policristalino (PCD) para el mecanizado de aleaciones ligeras y composites de fibras de vidrio y carbono, el nitruro de boro (CBN) en herramientas de geometría definida y en muelas de rectificado, y las cerámicas sin óxidos (N_4Si_3) para el mecanizado de fundiciones.

Las propiedades más importantes a tener en cuenta para la selección de herramientas de corte son:

- § Tenacidad a la fractura.
- § Elevada estabilidad físico-química a altas temperaturas.
- § Elevada dureza a altas temperaturas.
- § Resistencia al desgaste.

Por lo general, es difícil que un material determinado presente altas prestaciones en todas las posibles aplicaciones del mecanizado, ya que existe una gran cantidad de condicionantes y requerimientos. El requerimiento principal para herramientas de corte empleadas con altas velocidades de corte es la resistencia al desgaste a alta temperatura, mientras que a grandes avances la herramienta requiere mayores tenacidades. La *Tabla 9* resume las aplicaciones y condiciones de corte de referencia para algunos tipos de herramienta en el fresado.

| MATERIAL PIEZA | MATERIAL HERRAMIENTA | CONDICIONES DE REFERENCIA |
|-------------------------|---------------------------------------|---|
| Aleaciones ligeras | Metal duro PCD | V=5000m/min |
| Fundición gris | N ₄ Si ₃ | V=1200m/min |
| Acero tratado HRc=45 | Carburo micrograno revestido TiAlN | V=300-400m/min (con refrigeración por micropulverización) |

Tabla 9. Aplicaciones y condiciones de corte de referencia para las herramientas de fresado.

2.2.3. Portaherramientas

En las operaciones de fresado, el portaherramientas es la interface entre la herramienta de corte y el husillo, y asegura la transmisión del movimiento de rotación del husillo a la herramienta. Un portaherramientas inadecuado puede tener efectos negativos en las piezas mecanizadas, tanto en lo que se refiere a la precisión dimensional como a la calidad superficial de la misma, y puede reducir la vida útil tanto de la herramienta como del husillo (Quintana et al., 2009). Estos efectos son especialmente críticos en el mecanizado de alta velocidad, proceso en el que los portaherramientas trabajan bajo condiciones muy duras. El diseño debe garantizar el cambio rápido de herramientas, así como también el correcto funcionamiento, precisión y repetibilidad. Además de los requerimientos generales en corte, para HSM hay demandas adicionales: alta concentricidad, bajo error de balance, alta precisión de posicionamiento, así como reducida fuerza centrífuga influenciada por pequeñas dimensiones radiales y masas. Debido a las altas velocidades, se producen efectos centrífugos en el cono del husillo y en la herramienta. El huso se expande más que la herramienta, y por lo tanto esta se desplaza axialmente debido a la fuerza, y esto debe evitarse usando topes.

En los portaherramientas hay que distinguir tres partes fundamentales:

- § La parte cónica que se introduce dentro del husillo de la máquina (*taper*).
- § La parte que permite sujetar el portaherramientas cuando éste está en el almacén de la máquina (*flange*).
- § La zona que aguanta la herramienta en el portaherramientas (*pocket*).

En lo que se refiere a la primera de las tres partes mencionadas, existen varios estándares a nivel comercial: BT, CAT, ISO y HSK, sin mencionar otros estándares que se utilizan en el mecanizado manual. De estos, el más comúnmente utilizado en las aplicaciones de alta velocidad y/o alta potencia es el HSK, que ofrece una serie de ventajas respecto a los demás estándares, importantes para el mecanizado de altas prestaciones, puesto que el *taper* es retenido en el husillo por medio de unas pinzas que fijan en el interior de la zona hueca a una distancia de la herramienta. A medida que la velocidad aumenta, el contacto metal a metal entre el husillo y el portaherramientas se mantiene, porque las fuerzas centrífugas hacen que las pinzas de amarre se expandan dentro del portaherramientas, presionándolo fuertemente hacia el interior del eje del husillo. Esto incrementa la rigidez de la superficie de contacto y permite un corte más fuerte. Este funcionamiento puede observarse en la *Figura 5*. De esta manera, los puntos de contacto del portaherramientas son los que se muestran en la *Figura 6*.

Los sistemas de portaherramientas HSK proporcionan un grado de precisión mayor que el de las herramientas cónicas, en las que el cono tiende a desplazarse hacia el interior del husillo por efecto de la fuerza centrífuga, y además aseguran una gran precisión cuando se coloca y se quita del husillo. Como resultado, la fuerza de expulsión de la herramienta es más repetitiva y se mantiene la precisión.

Por los motivos mencionados, en la mayoría de los husillos de altas prestaciones el *taper* HSK es la mejor elección por su rigidez, repetibilidad y por el mejor ajuste a los husillos de altas prestaciones (Arnone, 2000). Sin embargo, los portaherramientas HSK sólo pueden utilizarse con máquinas-herramienta HSK, por lo tanto, no todos los portaherramientas disponibles en un determinado taller podrán ser utilizados en todas las máquinas-herramienta. Así pues, si en un taller hay una máquina-herramienta para alta velocidad de tipo HSK muy moderna, los portaherramientas más gastados no podrán utilizarse en el husillo de alta velocidad, y a la vez, los portaherramientas HSK no se

utilizarán en otras máquinas para realizar pasadas de desbaste a bajas velocidades.

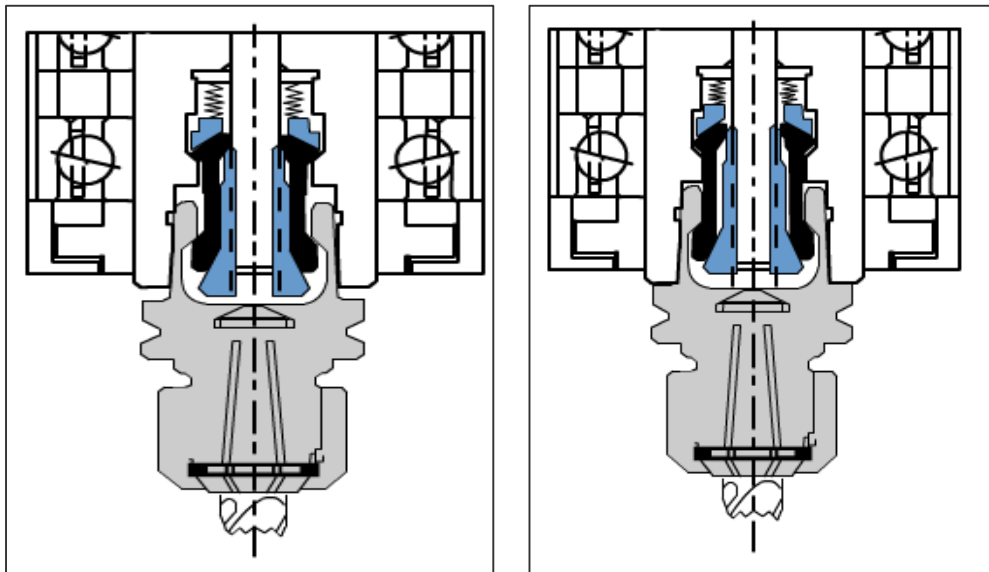


Figura 5. Funcionamiento de los portaherramientas HSK. A la izquierda, la situación de la herramienta con la máquina parada. A la derecha, las fuerzas centrífugas aprietan la herramienta contra el husillo.

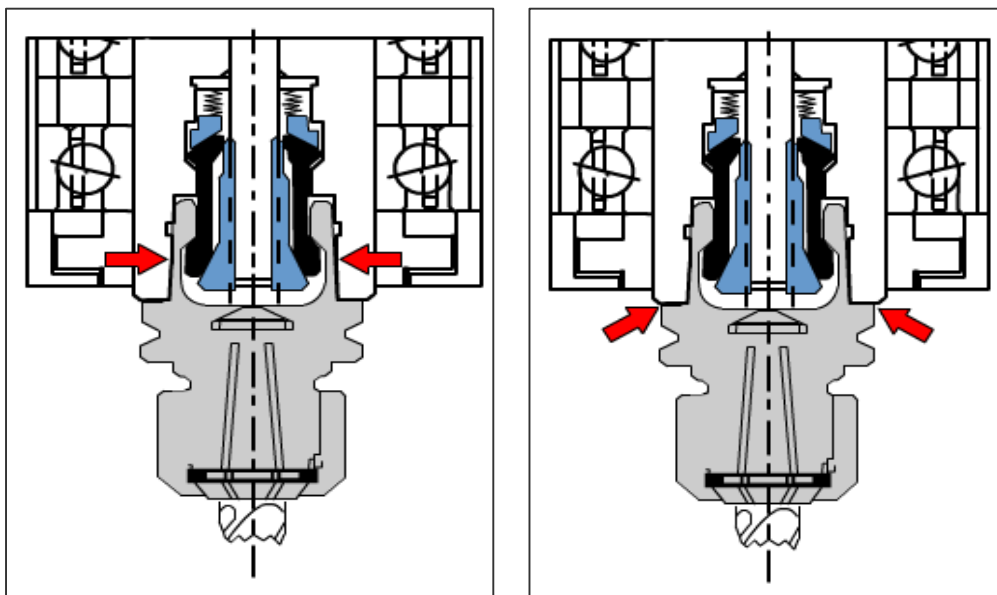


Figura 6. Puntos de contacto en el funcionamiento de los portaherramientas HSK.

En lo que se refiere a la zona del portaherramientas que permite la sujeción de la herramienta (*pocket*), las premisas exigidas son la rigidez de la unión, la alineación precisa del eje de la herramienta con el del husillo y la minimización de las vibraciones. En el contexto de esta tesis, el portaherramientas tiene una importancia notable por tratarse de una de las variables utilizadas en el trabajo experimental.

Existen diferentes tipologías de sistemas de sujeción: los sistemas mecánicos, los sistemas hidráulicos y finalmente los sistemas térmicos (Quintana et al., 2009). Los primeros son los más comúnmente utilizados incluso en mecanizado de alta velocidad, puesto que la relación coste/prestaciones es adecuada. Por este motivo, se ha utilizado uno de estos sistemas en la experimentación realizada.

Los sistemas hidráulicos, en cambio, son muy caros y poco flexibles puesto que cada portaherramientas admite únicamente herramientas de un determinado diámetro, lo que supone un inconveniente importante. Finalmente, destacan los sistemas térmicos, que tienen una relevancia especial en este caso por tratarse del otro sistema utilizado en el trabajo experimental realizado, motivo por el cual se explican brevemente: a temperatura ambiente, la apertura es más pequeña que la herramienta. Entonces es necesario calentar la apertura de manera que la expansión térmica permita la introducción de la herramienta. Entonces el portaherramientas se enfría de nuevo volviendo a su dimensión original, de manera que la herramienta queda firmemente cogida al portaherramientas. La rigidez de este sistema de sujeción es muy elevada, aunque el sistema en sí mismo es más sencillo que el hidráulico anteriormente comentado. Sin embargo, tiene como inconvenientes un precio elevado y la necesidad de disponer de un sistema de calentamiento y, en algunos casos, también de enfriamiento.

2.2.4. Controles numéricos

La evolución del sector de la máquina-herramienta está siendo acompañada por el desarrollo de controles numéricos capaces de dar respuesta a las nuevas exigencias de los procesos productivos. La adecuada ejecución de algunos procesos productivos complejos, junto con la necesidad de garantizar la seguridad de los operarios, ha obligado a los fabricantes de controles numéricos a incluir funciones adicionales, orientadas a la monitorización y protección de motores, periféricos y herramientas (Haber et al., 2005), así como proporcionar funciones

orientadas a la optimización de los parámetros de mecanizado, especialmente la velocidad de corte.

En el caso del mecanizado de alta velocidad, en el que las máquinas-herramienta están hechas de más de 2.000 componentes eléctricos/mecánicos (Repetto, 2002), que son parte de un sistema gobernado por un CNC, el desarrollo y mejora del control numérico tiene una importancia capital.

La evolución de los controles numéricos afecta a la mejora del proceso productivo en distintos aspectos (Aranceta et al., 1999):

- § Optimización de la dinámica de la máquina.
- § Mejora de las prestaciones.
- § Incremento del control sobre las condiciones de mecanizado en el proceso de monitorización.
- § Aumento del control sobre el estado de la máquina.
- § Incorporación de aplicaciones de soporte a las tareas de mantenimiento, asistencia técnica o a la operación normal de máquina.

Las nuevas generaciones de controles numéricos ofrecen una serie de funciones avanzadas, cuya utilización permite optimizar la dinámica de los lazos de control, reduciendo el efecto de rozamientos, holguras y errores de seguimiento, o modificando de forma adaptativa las leyes de control.

Las funciones avanzadas más importantes que incorporan los nuevos controles numéricos son las siguientes (Aranceta et al., 1999):

- § Compensación de par de fricción estática y de holguras, para solucionar el efecto que se produce durante los cambios de dirección asociados a la ejecución de movimientos circulares, en que tiene lugar un cambio de par, que provoca en el eje afectado un aumento transitorio de su velocidad.
- § Control de avance *feed-forward*, que permite aumentar la velocidad de avance y reducir el error de seguimiento.
- § Control de aprendizaje, que permite reducir el error de seguimiento en procesos de fabricación repetitivos, mediante el “aprendizaje” de la señal que debe aplicarse al control.

- § Control adaptativo, que tiene la facultad de cambiar los parámetros del controlador mediante un proceso interno de medida y evaluación, adaptándolos a los cambios del sistema.
- § Opciones adicionales, como el control predictivo o la compensación de perturbaciones.

Hay un aspecto importante a destacar que es la forma como se especifican las trayectorias que debe seguir la herramienta de manera que sean comprensibles y ejecutables por el CN, y este aspecto es especialmente importante en la generación de trayectorias curvas, ya sean en dos o tres dimensiones. En general, se utilizan diferentes tipos de interpolaciones que permiten definir puntos sobre las curvas y trayectorias entre dichos puntos. Existen básicamente tres tipos de interpolaciones:

- § Interpolación lineal (G01): es la forma más habitual de especificar las trayectorias que debe seguir la herramienta en una operación de mecanizado. Está basada en la generación de una sucesión de puntos, entre los cuales se realizan interpolaciones lineales. La aproximación de una trayectoria curva mediante una serie de tramos rectos supone una pérdida de precisión. Para mantener un grado de precisión constante a lo largo de toda la trayectoria, es necesario que el número de puntos especificado sobre la curva, es decir, la densidad de puntos, sea mayor en el caso de trayectorias con pequeño radio de curvatura que en el caso de trayectorias casi rectas. De forma equivalente, un aumento en los requerimientos de precisión a lo largo de toda la superficie mecanizada obliga a especificar un mayor número de puntos en la definición de las trayectorias. Además, hay que tener en cuenta que las discontinuidades de la velocidad en las intersecciones de los segmentos lineales provocan grandes aceleraciones, acabados superficiales deficientes, precisión dimensional y superficial limitada y elevados tiempos de ciclo (Müller et al., 2004).
- § Interpolación circular (G02 y G03): consiste en reemplazar los segmentos lineales mencionados en la definición de la interpolación G01 por arcos cíclicos. Este tipo de interpolación puede aplicarse únicamente en mecanizados en dos dimensiones. Permite obtener un perfil más suave y continuo que la interpolación lineal (Qiu et al., 1997), pero se utiliza de forma muy minoritaria en la definición de trayectorias de mecanizado por la dificultad de definir el número de arcos necesario para conseguir que las intersecciones entre arcos sean lo más continuas posible.

§ Interpolación polinomial: la interpolación mediante polinomios de diferentes órdenes o *splines* se está posicionando como una alternativa prometedora a la interpolación lineal, principalmente para el mecanizado de superficies complejas en tres dimensiones. Existen diferentes tipos de *splines*, y es posible adecuar esta interpolación a las necesidades del producto a fabricar. Este tipo de interpolación, sin embargo, tiene la dificultad de conseguir el avance deseado a lo largo de la superficie. Entre las interpolaciones polinomiales más utilizadas destacan las NURBS (*Non-Uniform Rational B-Splines*), que definen una curva o superficie a partir de varios puntos de control, no necesariamente pertenecientes a la trayectoria, y unos pesos asociados a los mismos. Los pesos actúan esencialmente como la gravedad, produciendo deformaciones en la dirección de los puntos de control. Este tipo de interpolación tiene una mayor utilización en el HSM.

La *Figura 7* muestra la diferencia entre la utilización del formato lineal estándar y la utilización de NURBS.

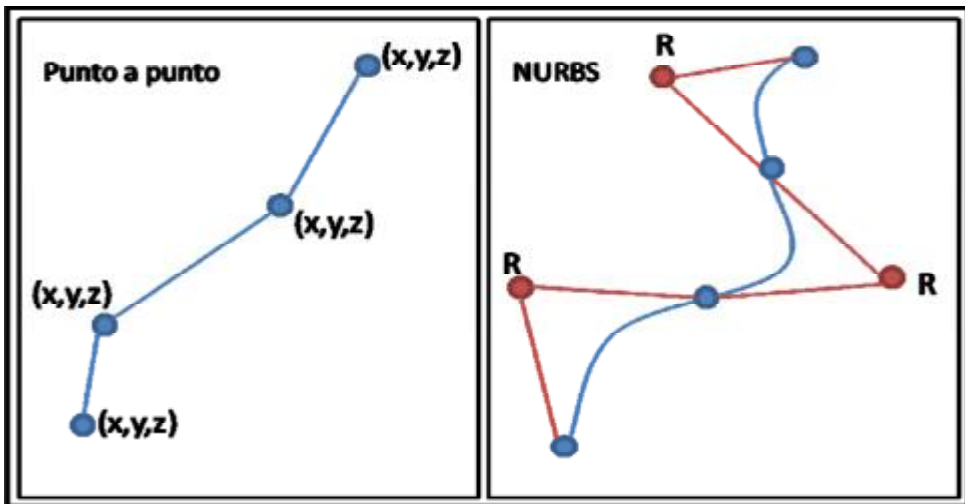


Figura 7. Definición de una curva en el formato lineal estándar (izquierda) y en el formato basado en splines (derecha).

En los tres casos mencionados, cuando se aplican a superficies curvas, y especialmente en los dos primeros, el hecho de tener que procesar una gran cantidad de puntos con precisión y a gran velocidad es un reto difícil para los controles numéricos. Una forma de medir la eficacia de un control numérico es utilizar el parámetro *tiempo de proceso de bloque*, o su inversa, el número de bloques por segundo que puede ejecutar el control. Hay que entender el tiempo de proceso de bloque como el

tiempo necesario para interpretar y ejecutar el movimiento programado en el bloque. Este tiempo define la rapidez y la precisión con la que se puede realizar el mecanizado.

En HSM, la alta velocidad de mecanizado impone la adopción de una serie de soluciones en los controles numéricos, para hacer frente a las elevadas exigencias a las que son sometidos. La manera en la que los controles ejecutan las trayectorias programadas punto a punto es ir de uno al siguiente con la velocidad y aceleración establecidas. Si los puntos están muy juntos, el eje no tiene tiempo de alcanzar la velocidad marcada con las aceleraciones convenidas, por lo que está acelerando y desacelerando continuamente, sin alcanzar la velocidad programada.

Por otra parte, del desplazamiento a velocidad elevada de la herramienta a lo largo de la trayectoria de referencia pueden resultar desviaciones en aquellos tramos en los que el radio de curvatura de la trayectoria sea pequeño. Para estos casos, la función *look-ahead*, permite eludir estos inconvenientes mediante la evaluación de los datos de la trayectoria varios bloques por delante de la ejecución actual (aproximadamente 180 bloques por delante). Esta función precalcula la velocidad y aceleración apropiadas para cada bloque, y genera un perfil de velocidad y aceleración teniendo en cuenta los requerimientos de la trayectoria programada. De esta forma, el valor de la consigna de velocidad alcanzable puede aumentarse, con la seguridad de que la necesidad de disminuirlo se detectará con suficiente antelación como para alcanzar un error de seguimiento aceptable. La información precalculada se transmite a un *buffer* interno del CNC, desde el cual es requerida cuando se necesita en el proceso que ya se está llevando a cabo. En el caso de que el *buffer* quede vacío porque el control numérico no puede seguir el avance, la máquina hará una parada hasta que la siguiente línea precalculada esté disponible. Este efecto se llama *data starvation*. Cuanto más pequeño sea el tiempo de proceso de bloque del CNC, menos líneas tiene que precalcular para evitar este efecto. Por otro lado, esta función permite adaptar el avance lineal a las variaciones en la geometría de la superficie, de manera que cuanto mayor sea el cambio de dirección que la herramienta tenga que hacer en los próximos bloques, menor es el avance actual (López de Lacalle et al., 2002). En las *Figuras 8 y 9* se muestra el funcionamiento de esta función.

Otro ejemplo son los algoritmos llamados *Knowledge of Stock Remaining*, que permiten actualizar el stock después de cada recorrido de la herramienta, y utilizan esta información para determinar si hace falta una profundidad de mecanizado extra para obtener el resultado buscado y para optimizar las siguientes trayectorias.

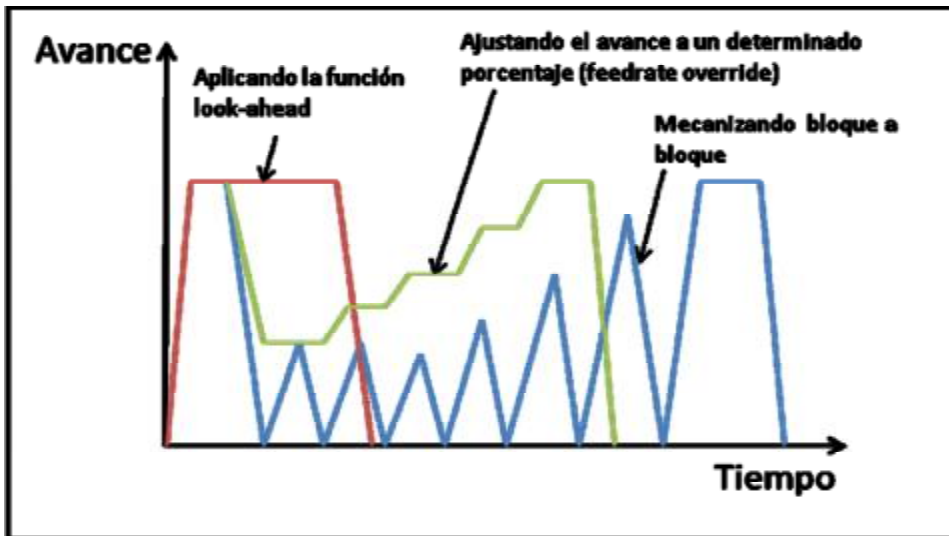


Figura 8. Comparación de los perfiles del avance para bloques consecutivos cortos. Fuente: adaptado de Han et al. (1999).

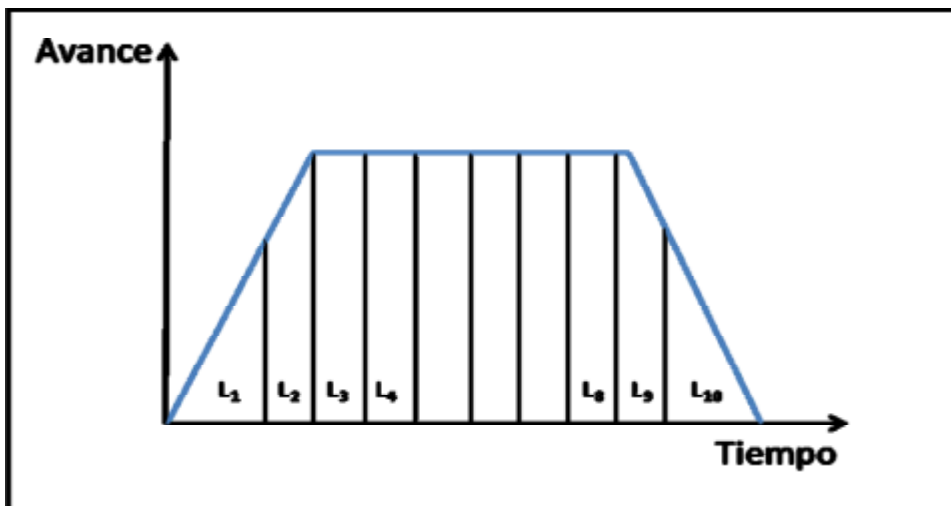


Figura 9. Avance en función del tiempo usando un algoritmo look-ahead. Fuente: adaptado de Han et al. (1999).

2.3. Análisis de la precisión dimensional

Son muchos y muy diversos los factores del fresado de alta velocidad que tienen influencia en la calidad de la pieza final y en la economía de su fabricación (Vivancos et al., 2004).

La precisión (*accuracy*) de las piezas mecanizadas, es decir, el grado de conformidad de la pieza final con las especificaciones geométricas y dimensionales, es un factor crítico, hasta el punto que si no se consigue esta precisión, el HSM quedaría relegado únicamente a operaciones de desbaste y el acabado tendría que realizarse mediante otros procesos, como el mecanizado tradicional (Dong et al., 2004).

La precisión dimensional tiene varios factores determinantes. Según Schmitz et al. (2008), estos factores pueden clasificarse en cuatro grupos: los errores geométricos de la construcción de la máquina, los errores inducidos térmicamente por las fuentes de calor asociadas a la máquina y al propio proceso de mecanizado, los errores de seguimiento de la trayectoria causados por el control y la propia dinámica de la máquina-herramienta, y finalmente los errores debidos a las fuerzas de corte.

Otros autores (CIRP Working Group, 1998; Vivancos et al., 2004) afirman que las fuentes de error dimensional pueden ser múltiples, incluyendo factores como son el material de la pieza y la herramienta, la geometría de la herramienta y su sistema de sujeción, las condiciones de corte, el comportamiento de la máquina-herramienta y del control, el tipo de interpolación utilizado en la generación de los programas de CNC y la utilización de refrigerantes, entre otros.

Hay que tener en cuenta que el mecanizado se asocia con elevadas temperaturas en la interface pieza-herramienta y, por lo tanto, los aspectos térmicos del proceso de corte afectan sobremanera la precisión del proceso de mecanizado (Abukhshim et al., 2006). Las elevadas temperaturas de corte tienen gran influencia sobre el desgaste de la herramienta, su tiempo de vida, la calidad superficial de la pieza y el mecanismo de formación de la viruta y contribuyen a la deformación térmica de la herramienta de corte, que es considerada, entre otros, como un factor determinante de los errores en el mecanizado (Takeuchi et al., 1982).

Analizar individualmente el efecto de cada uno de estos factores sobre el resultado final tiene gran interés. Así pues, en los últimos años se han llevado a cabo varias investigaciones en las que se ha correlacionado

alguno de los factores antes mencionados con la rugosidad superficial de la pieza: Vivancos et al. (2004) y López de Lacalle et al. (2002, a) son algunos ejemplos para el caso del mecanizado de aceros. Coelho et al. (2004) lo es para el mecanizado de aleaciones de aluminio. En cambio, pocas investigaciones han analizado la relación de estos factores con la precisión dimensional. En este sentido destacan las realizadas por Terrier et al. (2004) y sobretudo el trabajo hecho por Yih-fong y Ming-der (2005), y el posterior desarrollo realizado por Yih-fong (2007), en los que se presenta una pieza test muy interesante para la medida de la precisión dimensional, y donde se identifican factores como la velocidad de avance, la de corte o el número de dientes de la herramienta como factores muy determinantes de la precisión dimensional. También cabe mencionar el trabajo de Liu et al. (2002), en el que correlaciona la geometría final obtenida con la distribución de fuerzas durante el proceso de mecanizado. Este mismo enfoque es utilizado para el análisis por Dotcheva y Millward (2005).

Cabe destacar el trabajo de Chu et al. (2008) que define un algoritmo para la mejora de la precisión dimensional en el mecanizado de 5 ejes, aunque únicamente tiene en cuenta los errores introducidos por las interpolaciones lineales (G01).

Otro objetivo clave de las investigaciones recientes ha sido la optimización de las condiciones de corte en mecanizado de alta velocidad, y en este campo sí pueden encontrarse una gran variedad de trabajos: Kaldos et al. (1996), que se basa en el mecanizado de aleaciones de aluminio, o Chien y Tsai (2003), Juan et al. (2003), López de Lacalle et al. (2002, b) y Vivancos et al. (2004), basados en el mecanizado de aceros.

2.4. Análisis del tiempo de ciclo

El fresado de alta velocidad es una tecnología de fabricación que se utiliza cada vez más para mecanizar aleaciones de aluminio, especialmente en sectores en los que se requiere extraer gran cantidad de material de forma muy rápida, como pueden ser el sector aeronáutico o el de moldes y matrices.

Así pues, una de las particularidades del fresado de alta velocidad consiste precisamente en la posibilidad de conseguir tiempos de ciclo más bajos que en mecanizado convencional, sobretudo en el mecanizado de materiales de elevada maquinabilidad como es el

aluminio. Sin embargo, aunque evidentemente el uso de la alta velocidad tiene una influencia destacable sobre la reducción del tiempo de fabricación, hay otros factores a considerar que pueden tener también un efecto positivo, sobre todo si pensamos en el mecanizado de geometrías complejas (como superficies esculpidas, caso sumamente habitual en los sectores antes mencionados). En estos casos puede ser difícil conseguir avances elevados, puesto que las continuas aceleraciones y deceleraciones que se producen si la pieza presenta una superficie muy compleja dificulta, a veces, alcanzar el avance programado.

En general, los únicos parámetros que se tienen en cuenta para optimizar el tiempo de ciclo son las condiciones de corte (avance, profundidad de pasada y velocidad de corte). Sin embargo, es necesario plantearse qué otras condiciones de fabricación pueden tener influencia sobre el tiempo de ciclo, y especialmente qué configuración se debe dar a dichas condiciones para optimizarlo y conseguir así una mayor eficiencia en la producción. Así pues, es necesario considerar que cada elemento que interviene en el proceso de mecanizado tiene influencia sobre el resultado final del proceso. Mientras que varios autores se limitan a considerar las condiciones de corte y los tiempos improductivos (Bouazid, 2005; Choudhury y Appa Rao, 1999), otros muestran una visión más amplia en este sentido: Bouazid et al. (2004), en su estudio sobre la evaluación y optimización de costes de mecanizado, tienen en cuenta por ejemplo el tipo de geometría a mecanizar como un condicionante a la hora de evaluar el tiempo de ciclo, y Monreal y Rodríguez (2003) analizan la influencia de los recorridos de la herramienta en la duración total del ciclo de mecanizado. Destaca también la propuesta de Siller et al. (2006), que correlaciona el tiempo de ciclo con las condiciones de corte pero teniendo en cuenta también la complejidad geométrica de la superficie que se mecaniza.

Cabe decir que hay algunas características de los centros de mecanizado, relacionadas con su comportamiento, que no son fácilmente cuantificables y que tienen gran importancia en el resultado obtenido. Se trata, en definitiva, de todos aquellos elementos que determinan el comportamiento dinámico de la máquina. El control numérico es también un elemento importante en el mecanizado: según las prestaciones del control, éste puede disponer de opciones para mecanizado de precisión, y funciones como el *look-ahead* o el *feed-forward* que se consideran muy importantes en mecanizado de alta velocidad. Otro elemento que tiene gran relación con el control es el programa de control numérico. Cabe destacar el tipo de interpolación utilizada en la generación de las trayectorias de la herramienta como un elemento que puede introducir variabilidad en los tiempos de ciclo. Aunque en la mayoría de ocasiones se utiliza la interpolación lineal, cuando se trata del fresado de superficies

esculpidas es interesante plantearse la posibilidad de utilizar interpolaciones circulares con el fin de reducir el tamaño de los programas, mejorar la precisión dimensional o incluso reducir el tiempo de ciclo. Sin embargo, no todos los controles son capaces de procesar trayectorias circulares, por lo cual la solución adoptada mayoritariamente es la interpolación lineal.

2.5. Modelización del proceso de mecanizado de alta velocidad

La modelización de los procesos de mecanizado es un tema de gran interés y ampliamente estudiado desde hace muchos años, hasta el punto que en el año 1995, la asociación *CIRP STC "Cutting"* creó un grupo de trabajo específico para este ámbito (CIRP Working Group, 1998). Según este grupo, las principales dificultades que se encuentran a la hora de modelizar el proceso son debidas principalmente a dos factores: (a) la falta de comprensión de los mecanismos básicos y las interacciones de la herramienta de corte y el material de la pieza, incluso en los mecanizados más sencillos; (b) la gran variedad y complejidad de operaciones de mecanizado existentes, con diferentes propósitos.

Actualmente existen un gran número de investigadores y grupos de investigación que proponen diferentes modelos para el mecanizado en general, y algunos específicos para el mecanizado de alta velocidad. Estos modelos pueden clasificarse en dos grupos: los que modelizan las variables del proceso, y los que modelizan el desempeño del proceso. En ambos casos, las variables de entrada más frecuentes pueden ser las condiciones de corte, las características del material y/o de la herramienta o las características dinámicas de la máquina-herramienta, entre otras. Sin embargo, las variables que se intentan modelizar son claramente diferentes, y mientras que en el primer caso se pretende predecir las fuerzas de corte, la temperatura en la interfaz pieza-herramienta o el proceso de formación de la viruta, en el segundo se pretende obtener la calidad superficial, el desgaste de la herramienta o la precisión de la pieza final. Por lo tanto, el modelo que se pretende desarrollar en esta tesis pertenece a este segundo grupo.

Existen dos enfoques tradicionales para el modelizado del mecanizado: el científico, basado en la física del proceso y en el desarrollo de relaciones basadas en modelos quasi-estáticos (como por ejemplo el famoso modelo de Marchant), y el ingenieril, que se basa en la extrapolación de resultados experimentales (un ejemplo podría ser el

modelo de Taylor). Sin embargo, existe un tercer enfoque, el de las bases de datos de mecanizado, que intenta obtener conclusiones a partir del análisis de conjuntos de datos obtenidos del mecanizado (CIRP Working Group, 1998).

Puesto que el proceso de mecanizado es no-lineal, es difícil modelizarlo mediante los métodos tradicionales. Por este motivo, las técnicas no tradicionales, como el método de los elementos finitos -Mackerle (2003) hace un repaso a los principales trabajos realizados en este ámbito- o las técnicas que se basan en conjuntos de datos, han sido ampliamente utilizadas con este propósito. Buen ejemplo de estas técnicas son las redes neurales artificiales (*Artificial Neural Networks, ANN*), modelos matemáticos compuestos de varias neuronas situadas en diferentes capas y enlazadas por pesos variables. Estos pesos se calculan de forma iterativa durante un proceso de entrenamiento cuando la red se enfrenta con datos (parejas de *input* y *output* que representan el proceso que se quiere modelizar) específicos para este propósito. Comparadas con otros métodos, las ANNs son más robustas y globales. Además, son adaptativas, se pueden implementar fácilmente y pueden modelizar múltiples variables. Por esta razón las ANNs son ampliamente utilizadas para la modelización de sistemas, optimización de funciones, procesamiento de imágenes y para el control inteligente. Ofrecen un tipo de relación implícita entre las variables de entrada (*inputs*) y salida (*outputs*) mediante el aprendizaje a partir de un conjunto de datos que representan el comportamiento de un sistema (El-Mounayiri et al., 2005).

Hay varios autores que han utilizado las redes neurales para la modelización de diferentes aspectos relacionados con el proceso de mecanizado. Por ejemplo Raj et al. (2000), Ezugwu et al. (2005) y Muthukrishnan y Davim (2009) las utilizan para modelizar la relación entre los parámetros de corte y los parámetros de proceso (fuerza, potencia consumida, acabado de la pieza final, etc.), mientras que también hay varios trabajos orientados a modelizar el efecto de los parámetros de corte sobre la calidad superficial de las piezas mecanizadas: Jiao et al. (2004), Ozcelik y Bayramoglu (2006), Davim et al. (2008), Korosec y Kopac (2008) y Lu (2008). Finalmente, existen algunos autores que relacionan las variables de proceso con el desgaste de las herramientas, como son Obikawa y Shinozuka (2004) o Kurt (2009). En cualquiera de los casos mencionados, las redes neurales demuestran ser una técnica válida y adecuada para la modelización del proceso de mecanizado.

2.6. Selección de centros de mecanizado para alta velocidad

Cuando una empresa fabricante de piezas decide invertir en un nuevo centro de mecanizado, la selección debe hacerse entre cientos de modelos y tipos diferentes, considerando muchas especificaciones contrapuestas como son el tamaño de la mesa, la velocidad del husillo, la potencia, el recorrido de los ejes, la precisión de posicionamiento, la repetibilidad, el tamaño y material de las piezas que se fabricarán, los requerimientos de las herramientas, etc. (Kalpakjian y Schmid, 2001; Tlusty, 2000; Quintana et al., 2007).

Una revisión de la literatura permite detectar varios trabajos que tienen como objetivo desarrollar sistemas de soporte a la decisión vinculados a la producción mecánica, aunque muchos de ellos están enfocados principalmente a la selección de procesos o de materiales. En este ámbito, destacan los trabajos realizados por Brown y Wright (1998) y Smith et al. (2003), que desarrollaron el *Manufacturing Advisory Service* (MAS), basado en internet. Esta herramienta determina los procesos de fabricación más adecuados para una determinada pieza a partir de los parámetros de diseño de la misma. También cabe mencionar el MAMPS, *Material and Manufacturing Process Selection* (Giachetti, 1998), un sistema de selección de procesos y materiales que permite calcular un ratio de compatibilidad entre los requerimientos del producto y las alternativas de fabricación. Así pues, permite obtener un conjunto de materiales y procesos de fabricación alternativos, con su correspondiente ranking de compatibilidad. Por su parte, Kaschka y Auerbach (2000), desarrollaron una metodología de soporte a la decisión para cadenas de procesos que está centrada en la fabricación de prototipos y modelos. Finalmente destaca Bock (1991), autor de CAMPS (*Computer Aided Material and Process Selector*).

En lo que se refiere a la selección de máquinas, aunque también es un tema ampliamente tratado en la literatura, hay que tener en cuenta que muchos trabajos hacen referencia a la selección de una máquina entre un parque de máquinas disponibles en una determinada planta de fabricación. Estos trabajos, entre los cuales destacan los realizados por Tabucanon et al. (1994), Lin y Yang (1996), Chung y Peng (2004) y Chtourou et al. (2005), son de aplicación principalmente en entornos productivos basados en células flexibles y formarían parte de un sistema CAPP (*Computer Aided Process Planning*).

A parte de los trabajos ya mencionados, también existen algunos trabajos referentes a la selección de máquinas desde la perspectiva de la inversión en nuevos equipos, tema más próximo al tratado en esta tesis.

Sin embargo, el número de trabajos de este tipo es mucho menor. Destacan principalmente los realizados por Bokhorst et al. (2002), Yurdakul (2004), Arslan et al. (2004) y Quintana et al. (2007). El primero desarrolla una herramienta para seleccionar máquinas-herramienta teniendo en cuenta las implicaciones estratégicas que esta decisión puede tener para la empresa, mientras que el segundo tiene en cuenta las implicaciones que puede tener la inversión en una determinada máquina respecto a la flexibilidad y capacidad productiva de la empresa. Arslan et al. (2004) basa su selección en múltiples criterios, algunos de ellos eminentemente técnicos pero otros que también hacen referencia directa a la flexibilidad y productividad de la empresa, como en el caso de Yurdakul (2004). Finalmente, el último se basa también en parámetros eminentemente técnicos, pero distinguiendo entre el sistema de selección más adecuado para el fabricante de máquinas y para el comprador de las mismas.

Desde el punto de vista de las técnicas utilizadas para la selección, cabe decir que pueden encontrarse muy diversas opciones. Por ejemplo, Lin y Tang (1996), Cimren et al. (2004), Yurdakul (2004), o Tansel Iç (2009) basan su selección en un proceso AHP (*Analytical Hierarchy Process*); Keung et al. (2001), Chan y Swarnkar (2006) y Önut et al. (2008) utilizan algoritmos genéticos; Vasilash (1997) desarrolla un programa basado en la búsqueda en bases de datos; Georgakellos (2005) presenta un modelo de priorización que incorpora criterios técnicos y comerciales, de forma similar a Arslan et al. (2004), que prioriza a partir de criterios técnicos y productivos; finalmente, Layek y Lars (2000) y Gopalakrishnan et al. (2004) proponen la utilización de sistemas expertos para la selección de centros de mecanizado.

El sistema de selección que se propone en esta tesis consta de varios pasos, de igual forma que en los trabajos realizados por Arslan et al. (2004) o Tansel Iç (2009). Sin embargo, la principal diferencia respecto a los sistemas definidos por estos autores es que el que se propone en la tesis basa su decisión en datos reales, obtenidos a través de un trabajo experimental.

2.7. Síntesis del estado del arte

Aunque en los apartados anteriores se ha demostrado la importancia de la fabricación mediante Mecanizado de Alta Velocidad, así como también la gran versatilidad y aplicabilidad que puede tener dicha tecnología en la

industria, es importante remarcar cuáles son las principales líneas de investigación en torno a esta tecnología.

Mientras que se observa que en los últimos tiempos la investigación relacionada con el desarrollo de las máquinas-herramienta está quedando en segundo plano, y se lleva a cabo actualmente por parte de los mismos desarrolladores y fabricantes, las investigaciones en torno a la mejora de los sistemas CAD/CAM para su utilización en HSM, aplicando, por ejemplo, trayectorias de herramienta específicas, tienen una importancia preponderante, así como también el desarrollo de los Controles Numéricos para poder responder cada vez más eficientemente a las demandas de precisión y velocidad.

Cabe destacar también la importancia de las investigaciones que tienen como objetivo el estudio del comportamiento de los materiales (tanto de la pieza que se mecaniza como de la herramienta de corte) con la finalidad de encontrar nuevos materiales que presenten un comportamiento mejorado.

Por otro lado, destacan aquellas investigaciones que van dirigidas a modelar los procesos de HSM y sus resultados, ya sea para poder predecir el acabado superficial de las piezas mecanizadas, las fuerzas de corte durante el proceso o el comportamiento de máquina y herramienta durante el mecanizado.

La tesis que se presenta está relacionada con esta línea de investigación, junto con la planificación de procesos de mecanizado de alta velocidad, que está ganando interés según el número de publicaciones aparecidas recientemente y su relevancia.

En la *Tabla 10* se relacionan las principales líneas de investigación y los autores más citados en las mismas.

| | | PRINCIPALES LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN | | | | | | |
|---|--|-------------------------------------|--|---|--|----------------------------------|---------------------------|---|
| Autor/es principal/es ² | Adscripción | Modelización del proceso HSM | Comportamiento de los materiales de piezas y herramientas para HSM | Selección de procesos (HSM vs. procesos sustitutos) | Mejora de trayectorias de herramienta para HSM | Planificación de procesos de HSM | Desarrollo de CN para HSM | Desarrollo de máquinas-herramienta para HSM |
| Alam, M.R. | National University of Singapore | | | | | X | | |
| Altan, T. | Ohio State University | | | | X | X | | |
| Aspinwall, D.K. Dewes, R.C. Toh, C.K. | University of Birmingham | X | X | | | | | |
| Affouard, A. Lartigue, C. Langeron, J.M. | Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée, École Normale Supérieure de Cachan | | | | X | | | |
| Ciurana, J. Quintana, G. | Grupo de Investigación en Ingeniería de Producto, Proceso y Producción, Universitat de Girona | X | | | | X | | |
| Duc, E. Chanal, H. | LARAMA, IFMA, Campus de Clermont-Ferrand/Les Cezeaux | | | | X | | X | X |
| Erkorkmaz, K. Altintas, Y. | The University of British Columbia | | | | | | X | |
| López de Lacalle, N. Lamikiz, A. Sánchez, J.A. Campa, F.J. | Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Bilbao | X | | | X | X | | |
| Özel, T. | Department of Industrial and Systems | X | X | | | | | |

² Por orden alfabético según investigador principal

| | | | | | | | | |
|-------------------------------|---|---|---|--|--|---|--|--|
| | Engineering, Rutgers University | | | | | | | |
| Rodríguez, C.A. Flores, V. | Center for Innovation in Design and Technology, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey | X | | | | X | | |
| Schultz, H. | Technical University of Darmstaad | | | | | | | |
| Sutter, G. | Université de Metz | | X | | | | | |
| Tansel Iç, Y. Yurdakul, M. | Faculty of Engineering and Architecture, Gazi University | | | | | X | | |
| Vivancos, J. Costa, L. | Universitat Politècnica de Catalunya | X | | | | | | |

Tabla 10. Autores más referenciados y sus principales líneas de investigación.

2.8. Descripción de los trabajos realizados

La tesis que se presenta consta de un total de cuatro artículos que responden a una misma línea de investigación. En los próximos capítulos se presentan los cuatro artículos, así como una descripción del proceso investigador que queda reflejado en dichos artículos, demostrando así la unidad temática de los mismos.

La tesis tiene como objetivo general definir una metodología para la selección de centros de mecanizado de alta velocidad. Esta selección se basa en dos grandes criterios: el primero, la máxima calidad de las piezas fabricadas en un determinado centro de mecanizado, medida en términos de precisión dimensional, y el segundo, el mínimo tiempo de ciclo en la fabricación, como una medida de la economía del mecanizado.

Para conseguir este objetivo ha sido necesario desarrollar varias actividades conducentes a alcanzar diferentes hitos parciales, de los cuales los principales se relacionan a continuación:

1. **Determinación de los parámetros de mecanizado que tienen mayor influencia sobre el tiempo de ciclo y la precisión**

dimensional, a partir de los resultados de investigaciones anteriores llevadas a cabo por varios autores. Para esta actividad se han tenido en cuenta principalmente los estudios realizados por Vivancos et al. (2004), López de Lacalle et al. (2002), Coelho et al. (2004), Terrier et al. (2004) y Monreal y Rodríguez (2003). Otros estudios más recientes, como Siller et al. (2006) o So et al. (2007) corroboran los resultados, especialmente para el tiempo de ciclo.

2. **Definición de una metodología para la optimización de los parámetros de corte en el fresado de alta velocidad.** Esta optimización se basa en la obtención de piezas con la calidad exigida (en términos de calidad superficial y precisión dimensional) y en el mínimo tiempo de fabricación. Este trabajo ha tomado como punto de partida la metodología definida por Halevi y Weill (1995), que aplica básicamente al proceso de torneado, y su adaptación al proceso de fresado convencional realizada por Vidal et al. (2005).
3. **Definición de un método experimental para el análisis de los parámetros de mecanizado y su influencia en los resultados del proceso,** teniendo en cuenta los rangos de parámetros establecidos en la tarea anterior. Esta tarea incluye:
 - la selección del material y la pieza a mecanizar para simular, de la forma más adecuada, la industria usuaria del mecanizado de alta velocidad;
 - la aplicación del diseño de experimentos para la determinación de las pruebas a realizar;
 - la selección de los valores experimentales para los distintos parámetros a evaluar;
 - la elaboración de un procedimiento que define la metodología a utilizar para asegurar la minimización de los efectos de los parámetros cuya influencia no se desea analizar por quedar fuera del alcance de esta tesis (dilatación térmica, desgaste de la herramienta, vibración de la herramienta).
4. **Realización de la experimentación en diferentes centros de mecanizado.** Esta actividad comprende la repetición de 8 pruebas en cada uno de los 5 centros de mecanizado utilizados.
5. **Análisis inicial de los resultados obtenidos** para obtener conclusiones generales sobre los efectos de los diferentes parámetros en las respuestas evaluadas (precisión dimensional y tiempo de ciclo).
6. **Análisis en profundidad de los resultados experimentales,** a partir de las conclusiones generales obtenidas.

7. **Definición de una metodología para la selección de centros de mecanizado para alta velocidad.**
8. **Validación de la metodología** mediante la aplicación de las redes neurales.

Las actividades relacionadas en los puntos 1, 3, 4 y 5 se detallan en el primer artículo presentado (*“Experimental analysys of dimensional error vs. cycle time in high-speed milling of aluminium alloy”*). El segundo artículo (*“Evaluation and modeling of productivity and dynamic capability in high-speed machining centres”*), recoge también parte de la actividad mencionada en los puntos 3, 4 y 5. El tercer artículo (*“A system for optimising cutting parameters when planning milling operations in high-speed machining”*) describe la tarea definida en el punto 2 y sus resultados. Finalmente, el desarrollo y los resultados de las actividades que se mencionan en los puntos 6 a 8 se recogen en el artículo presentado en cuarto lugar (*“Design of a decision support system for machine tool selection based on machine characteristics and performance tests”*).

Capítulo 3. Artículo “Experimental analysis of dimensional error vs. cycle time in high-speed milling of aluminium alloy”

El artículo que se presenta en este capítulo tiene como objetivo analizar, de forma experimental, la influencia de algunos parámetros del proceso de mecanizado de alta velocidad en los resultados del mismo, entendiendo como tales la precisión dimensional de las piezas mecanizadas y el tiempo de ciclo para su fabricación. Ambos aspectos son muy importantes para los usuarios de los centros de mecanizado, el primero porque determina la adecuación del producto a sus especificaciones, y el segundo porque tiene gran repercusión en la planificación de los procesos de fabricación.

El artículo describe el estudio, a partir de fuentes indirectas, de los parámetros que mayor influencia tienen en el tiempo de ciclo y en la precisión dimensional, incluyendo un resumen del estado del arte en este ámbito. A partir de este estudio, se decide analizar los siguientes parámetros: avance, tipo de interpolación utilizada en la creación de los programas de mecanizado y tipo de sistema de sujeción de la herramienta utilizado. Para cada parámetro se definen los niveles que se explorarán, y se aplica el diseño de experimentos para la definición de las pruebas a realizar, escogiendo un análisis factorial total 2^3 .

Otro aspecto importante del trabajo experimental es la adecuada selección de la superficie esculpida que se mecanizará en las pruebas. El artículo recoge las principales especificaciones que debe cumplir dicha superficie y presenta un resumen de las principales superficies estándar que se utilizan habitualmente en experimentos relacionados con el mecanizado de alta velocidad. Finalmente, la superficie escogida es un perfil propuesto por el fabricante de centros de mecanizado MECOF, ligeramente modificada para asegurar el cumplimiento de todas las especificaciones.

Finalmente, se presenta el procedimiento diseñado para asegurar que la realización de los experimentos en los diferentes centros de mecanizado se realice en las condiciones lo más similares posible, y asegurando la minimización del efecto de otros factores que no forman parte del

alcance del trabajo presentado, como por ejemplo la dilatación térmica del husillo o la vibración de la herramienta.

A partir de lo descrito anteriormente se presentan los resultados de los experimentos realizados en dos centros de mecanizado y se realiza un análisis de los mismos, obteniendo algunas conclusiones interesantes. En lo que se refiere al tiempo de ciclo, destaca el hecho de que las pruebas realizadas a partir de programas en los que se ha definido el perfil a mecanizar mediante interpolaciones circulares han sido significativamente más rápidas, consiguiéndose una mayor reducción del tiempo de ciclo a velocidades de avance más elevadas. Cabe destacar también que la reducción en el tiempo de ciclo debida al aumento del avance no es lineal, es decir, para un determinado aumento del avance, el tiempo de ciclo no disminuye proporcionalmente sino en un porcentaje significativamente menor. Esta circunstancia es debida a que las exigencias dinámicas del perfil programado no permiten a la herramienta alcanzar el avance programado en una parte importante del ciclo, de manera que aunque se programe una velocidad mayor, la ejecución real del ciclo de mecanizado se produce, en gran parte, a una velocidad inferior a la programada. Este resultado permite, además, obtener información sobre el comportamiento dinámico de ambos centros de mecanizado, puesto que una mayor reducción del tiempo de ciclo al aumentar el avance es un síntoma claro de mayor capacidad dinámica de la máquina en cuestión.

En cuanto a la influencia de los parámetros analizados sobre la precisión dimensional, los resultados experimentales permiten concluir que la variación en el avance tiene una influencia prácticamente nula, mientras que el tipo de sistema de sujeción utilizado tiene una influencia significativa. De los dos sistemas de sujeción analizados, de tipo mecánico y de tipo térmico, se observa que el segundo permite obtener una respuesta claramente superior. Cabe destacar también que las pruebas correspondientes al perfil definido con interpolaciones circulares tienen menor precisión dimensional que las correspondientes a interpolaciones lineales, y esta diferencia es especialmente significativa en curvas convexas. Así pues, aunque a partir de los resultados del análisis del tiempo de ciclo pudiera establecerse la conveniencia de utilizar de forma generalizada la interpolación circular, este resultado demuestra que en casos en que la precisión dimensional sea un aspecto muy restrictivo puede ser mejor utilizar la interpolación lineal.

M. Albertí, J. Ciurana and C.A. Rodriguez. "Experimental analysis of dimensional error vs. cycle time in high-speed milling of aluminium alloy". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Vol. 47, issue 2 (February 2007) : p. 236-246.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.04.009>

Department of Mechanical Engineering and Industrial Construction, University of Girona, Girona, Spain

Centro de Innovación en Diseño y Tecnología, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Monterrey, Mexico

Received 12 October 2005; revised 4 April 2006; accepted 25 April 2006. Available online 9 June 2006.

Abstract

Manufacturers of machined aluminium parts are among the principal users of high-speed milling. The excellent machinability of aluminium allows this technology to be used with severe cutting conditions, and at the same time permits the machining of complex shapes. There are many factors influencing the quality of manufactured aluminium parts and the economics of the manufacturing process, but little corresponding data is available, making process planning enormously difficult.

The aim of the work presented in this article is to experimentally analyse the influence of some of these factors, specifically the feed rate, the type of interpolation and the toolholder, on the dimensional accuracy of the product and the cycle time. Design of experiments (DoE) is used to determine which experiments have to be conducted to obtain a mathematical model that relates the mentioned factors with the responses.

The results show that the toolholder has considerable influence over dimensional accuracy and that the type of interpolation appreciably affects the cycle time. Details of the first-order interactions between factors have been included.

Keywords: High speed machining; Dimensional error; Cycle time; Tool path

Capítulo 4. Artículo: “Evaluation and modeling of productivity and dynamic capability in high-speed machining centers”

El artículo que se presenta tiene como objetivo analizar la influencia del tipo de interpolación usada en la creación de los programas de mecanizado, así como también de dos parámetros del centro de mecanizado como son la aceleración y el *jerk* (variación de la aceleración respecto al tiempo), en la productividad y capacidad dinámica de los centros de mecanizado para alta velocidad. En el trabajo realizado, la productividad se mide en términos de tiempo de ciclo, mientras que la capacidad dinámica se mide mediante el cálculo del error de seguimiento.

Para conseguir el objetivo propuesto, la investigación que se detalla en el artículo hace un estudio de los factores relacionados con el proceso de mecanizado que tienen mayor influencia sobre la productividad y la capacidad dinámica, este estudio se realiza principalmente a partir de tres actividades claramente diferenciadas: (a) el estudio del estado del arte mediante fuentes indirectas (literatura, resultados de ensayos publicados); (b) el trabajo experimental, que permite obtener resultados específicos para los parámetros objeto de análisis; (c) la definición de un modelo que relaciona los parámetros analizados con la productividad, y su aplicación a un caso de estudio.

La primera de estas actividades permite establecer que algunos de los parámetros que mayor influencia tienen sobre la productividad y la capacidad dinámica de los centros de mecanizado son el tipo de interpolación utilizado en la creación de los programas de control numérico, así como la aceleración y el *jerk* de los propios centros.

La segunda actividad mencionada, el trabajo empírico, consta de varias pruebas sencillas que permiten medir el tiempo de ciclo, la aceleración y el *jerk* en dos tipos de geometrías: superficies esculpidas y polígonos regulares. Para el primer tipo, se utiliza la adaptación del perfil MECOF, diseñada durante la realización del trabajo recogido en el artículo presentado en el capítulo anterior (Albertí et al., 2007), y los resultados obtenidos se utilizan para analizar la influencia del tiempo de ciclo en el tipo de interpolación.

En cuanto a la experimentación con los polígonos regulares, se realiza el proceso de mecanizado en vacío de varios polígonos cuyos lados difieren en longitud, desde un hexágono regular de 200mm hasta uno de prácticamente 700mm, variando en intervalos de 100mm. Estos experimentos permiten hacer un cálculo aproximado de la aceleración instantánea y del *jerk* durante todo el proceso de mecanizado, lo que facilita comparar el avance instantáneo con el programado. De esta forma, se determina que la aceleración de la máquina limita el avance instantáneo, de manera que en gran parte del ciclo no se alcanza el avance programado. Por tanto, el tiempo de ciclo no presenta la disminución esperada para un aumento del avance programado. Este experimento permite demostrar también que el error de seguimiento aumenta al aumentar el *jerk*, tal como se explica en el artículo.

Finalmente, la creación del modelo que relaciona la variable productividad (en términos de tiempo de ciclo) con los factores mencionados (aceleración y *jerk*), se basan en un nuevo trabajo experimental, consistente esta vez en programar una serie de grandes cuadrados que se realizan al máximo avance programado de la máquina. Calculando el tiempo empleado en el mecanizado de cada lado del cuadrado, se pueden aplicar las ecuaciones especificadas en el artículo para calcular valores aproximados para la aceleración y el *jerk* máximos.

Finalmente, la validez de los modelos es analizada mediante su aplicación a un caso de estudio: una aproximación de un molde para la fabricación de las aspas de una turbina de viento. Los errores que se obtienen de la aplicación de los modelos oscilan entre el 2 y el 6%, demostrándose así que su aplicación puede ofrecer una aproximación realista a los valores reales de tiempo de ciclo y, por tanto, puede ser útil para la selección de centros de mecanizado.

V. Flores, C. Ortega, M. Alberti, C. A. Rodriguez, J. de Ciurana and A. Elias.
"Evaluation and modeling of productivity and dynamic capability in high-speed
machining centers". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
Vol. 33, numbers 3-4 (June 2007) : p. 403-411.

<http://dx.doi.org/10.1007/s00170-006-0784-z>

Tecnologico de Monterrey Department of Mechanical Engineering, Monterrey, Mexico

Tecnologico de Monterrey Center for Innovation in Design and Technology, Monterrey,
Mexico

Universitat de Girona Department of Mechanical Engineering and Industrial
Construction, Girona, Spain

Received: 6 April 2006; Accepted: 4 September 2006; Published online: 18 November
2006

Abstract

The current standards for machine tool performance evaluation do not consider productivity and dynamic capability at high feed rates. Therefore, industry does not have a basis for machine tool comparison. Testing was conducted with the Heidenhain KGM 181 grid encoder to record the actual path of the machine at high feed rates (up to 16 m/min). This paper shows the significance of linear vs. circular interpolation, acceleration and rate of change in acceleration (jerk) on the productivity and dynamic capability of this type of machine. Under high feed rate interpolations, the actual cycle time can differ significantly from the ideal cycle time (calculated with the traveled distance and programmed feed rate). A modeling approach with simple testing protocols is presented in order to predict the cycle time during machining with high feed rates. The proposed modeling approach provides less than 6% error in estimating cycle time.

Keywords: High-speed machining; Machine tool performance evaluation; Cycle time; Following error; Acceleration; Jerk; Sculptured surface machining; Grid encoder

Capítulo 5. Artículo: “A system for optimising cutting parameters when planning milling operations in high-speed machining”

El trabajo que se presenta a continuación tiene como objetivo la optimización de los parámetros de mecanizado en el fresado de alta velocidad, a partir de la metodología desarrollada por Halevi y Weill (1995), orientada básicamente al torneado tradicional, y siguiendo el enfoque que posteriormente propusieron Vidal et al. (2005) para la adaptación de dicha metodología al fresado, investigación en la que también participaron los autores de este artículo. Esta optimización se consigue mediante la aplicación de un algoritmo secuencial que, teniendo como variables de entrada todos los factores que intervienen en el mecanizado (volúmenes a mecanizar, geometrías, material de la pieza, calidad superficial requerida, etc.) permite calcular los parámetros de corte más adecuados para el proceso, es decir, el número de pasadas requerido, su profundidad y el avance en cada una de ellas.

Un aspecto importante de este trabajo es la validación final a partir de casos reales, para lo cuál es necesario escoger una muestra representativa de piezas. Para ello se utiliza la tecnología de grupos (Burbidge, 1975) aplicada a los procesos de fresado. Puesto que el campo de aplicación del fresado es muy amplio, se limita el estudio a las operaciones de planeado en todas sus variantes. Además, el artículo presenta la implementación de la metodología en un sistema informático, con el objetivo de facilitar la tarea de planificación del proceso al usuario y acercar el trabajo realizado a un sistema CAPP (*Computer Aided Process Planning*).

El punto de partida de este trabajo consiste en la determinación de los factores que tienen influencia en la selección de los parámetros de corte y que son necesarios para la aplicación de las metodologías de Halevi y Weill (1995) y Vidal et al. (2005). Se consideran factores técnicos, principalmente la rugosidad superficial requerida o las características de la herramienta, e incluso los efectos que tienen las pasadas de desbaste sobre las de acabado y las fuerzas que se alcanzan en el mecanizado con los parámetros escogidos. Algunos de estos factores son significativamente diferentes en el proceso convencional y en el de alta velocidad, clasificación que se realiza básicamente a partir del estudio de la literatura.

La siguiente tarea consiste en el desarrollo de los algoritmos que permiten obtener una propuesta de parámetros de corte a utilizar a partir de los factores antes mencionados. Dichos algoritmos deben considerar todas las posibles combinaciones de factores, distinguiendo entre pasadas de desbaste, semi-acabado y acabado. La optimización de los parámetros de corte se basa en dos tipos de estrategias diferentes:

- § La minimización del número de pasadas, que implica realizar cada pasada con la mayor profundidad de corte posible y que, por lo tanto, tiene como factor limitante la máxima longitud de corte de la herramienta.
- § La minimización de la profundidad de pasada, estrategia mucho más habitual en el mecanizado de alta velocidad.

La aplicación del algoritmo permite distinguir hasta 4 posibles casos, que van desde la conveniencia de realizar el mecanizado en una sola pasada hasta la posibilidad de realizarlo en una combinación de pasadas de desbaste, semi-acabado y acabado.

Finalmente, la aplicación de la metodología a los casos reales permite distinguir los parámetros de corte más convenientes para mecanizado tradicional y los más adecuados para mecanizado de alta velocidad, observándose diferencias destacables. Para facilitar la toma de decisiones al planificador de procesos, se ha incorporado a la herramienta informática un módulo de cálculo de tiempo y coste de mecanizado, lo que permite comparar ambas opciones y escoger finalmente la más acertada en términos tanto técnicos como económicos.

M. **Alberti**, J. Ciurana and M. Casadesús. "A system for optimising cutting parameters when planning milling operations in high-speed machining". *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 168, issue 1 (15 September 2005) : p. 25-35.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.09.092>

Department of Mechanical Engineering and Industrial Construction, University of Girona, Girona, Spain

Department of Business Administration, Management and Product Design, University of Girona, Girona, Spain

Received 12 September 2003; revised 27 September 2004; accepted 29 September 2004. Available online 10 December 2004.

Abstract

A highly important element when computer aided process planning (CAPP) is used consists to choose the manufacturing route in metal removal processes. The paper focuses on this problem related to high-speed machining technology. At present, decisions concerning the cutting parameters used in metal removal operations are based on experience.

The goal is to design a system which helps to select the parameters in the cutting process of milling and high speed milling. The algorithm is based on optimising the cost of the operation. The result is the parameters that take into account all the existing restrictive factors included in machining operations.

A wide range of parts have been evaluated, using group technology in order to choose representative cases. The results are evaluated with the values proposed in the reference manuals. The experiment has served to determine the different relationships between the factors that have an influence on milling operations when high-speed machining technology is used for all the pieces studied.

Applying our method helps to make the right decisions on the optimal parameters in mill and high speed mill operations as applied to the machining processes, and, leads to a reduction for both conventional milling and high speed milling operations in processing times while ensuring optimal finishing conditions.

Keywords: Machining Parameters; Computer aided process planning; High-speed machining; Decision support system

Capítulo 6. Artículo: “Design of a decision support system for machine tool selection based on machine characteristics and performance tests”

El estudio que se presenta tiene como objetivo la definición de un sistema de ayuda a la selección de centros de mecanizado para alta velocidad. Este sistema se basa en un algoritmo, implementado a través de redes neurales artificiales, para cuyo entrenamiento es necesario contar con datos procedentes de la experimentación. Por este motivo, el artículo se compone de dos partes claramente diferenciadas. En la primera, se presenta el experimento realizado, con sus resultados correspondientes, así como también la discusión de los mismos. En la segunda, se describe el sistema de ayuda a la selección de centros de mecanizado para alta velocidad, empezando por la arquitectura del sistema y continuando con su modelización a través de las redes neurales artificiales.

El trabajo experimental anteriormente mencionado es una evolución del ya utilizado en la investigación presentada en el Capítulo 3 de esta tesis, y tal como en ese caso, se trata de un diseño factorial total con tres factores a dos niveles cada uno, que tiene como objetivo medir la precisión dimensional de las piezas mecanizadas. Respecto al anterior, el experimento actual se ha realizado en un mayor número de centros de mecanizado, y los resultados se han analizado de forma más detallada, teniendo en cuenta, además de los factores ya considerados anteriormente (tipo de interpolación, avance y tipo de sistema de sujeción de la herramienta), las distintas características geométricas que pueden encontrarse en diferentes zonas del perfil mecanizado, así como la aceleración del centro de mecanizado, calculada a su vez a partir de un trabajo empírico. El artículo muestra la definición de las diferentes características geométricas a analizar (zonas cóncavas y convexas, radios de curvatura grandes y pequeños, y aristas vivas), y las zonas en las que quedan representadas dentro del perfil mecanizado, así como el tratamiento estadístico de los resultados experimentales, que permite obtener algunas conclusiones interesantes. Cabe mencionar el hecho de que las concavidades de tipo *macho* presentan menor error dimensional que las de tipo *hembra*, mientras que las aristas vivas también presentan un error pequeño que destaca por ser muy parecido en todos los centros analizados. También se observa un mayor error en las curvas de radios grandes que en las de radios pequeños. Asimismo, el artículo recoge algunas conclusiones referentes a los centros de mecanizado, cuyo error

nominal según los datos ofrecidos por los fabricantes parece ser considerablemente inferior al obtenido en el trabajo experimental.

Para el desarrollo de la arquitectura del sistema de selección de centros de mecanizado, se han definido diferentes tipos de variables que intervienen en la selección: variables de producto (referidas a sus especificaciones), de proceso (referentes a la forma en que se lleva a cabo el proceso de mecanizado) y de máquina (relacionadas con su configuración).

El sistema de selección se basa principalmente en el análisis de dos tipos de errores, el correspondiente a la máquina herramienta (E_m) y el correspondiente al proceso de mecanizado (E_p). Además, el sistema utiliza otros criterios de selección, como son el tiempo de ciclo (t_c), el coste del proceso (C_p) y el coste del centro de mecanizado (C_{MT}). El algoritmo de decisión es presentado en el artículo en forma de diagrama de flujo.

Finalmente, se presenta la modelización del algoritmo utilizando dos redes neurales artificiales multicapa con estructura 5-5-1 y 3-5-1 respectivamente, una para la predicción del error y la otra para la predicción del tiempo de ciclo, que se programan con el software *Matlab*. Las redes neurales han sido entrenadas, de forma que son capaces de calcular un *output* a partir de la suma de la media de los errores entre el *output* calculado por la red y el valor real. Sin embargo, lo que hace tan útiles las redes neurales para este tipo de sistemas es su capacidad de generalización, que les permite obtener un *output* muy próximo al esperado para valores de *input* parecidos a los utilizados en el entrenamiento de la red. Por este motivo, los datos obtenidos del trabajo experimental descrito en la primera parte del artículo se dividen en dos partes, de manera que una de las partes es utilizada para el entrenamiento de la red y la otra para su validación.

Las redes son entrenadas mediante el algoritmo más adecuado en cada caso, utilizando los datos disponibles, quedando patente que, aunque para el caso del error dimensional el conjunto de datos es suficiente para ofrecer resultados aceptablemente acertados, para el caso del tiempo de ciclo sería conveniente disponer de más datos que permitieran aumentar la confianza en los resultados. Aun así, la utilización de las redes neurales se muestra como un sistema adecuado para la predicción de los tiempos de ciclo y la precisión dimensional.

M. Alberti, J. Ciurana, C. A. Rodríguez and T. Özel. "Design of a decision support system for machine tool selection based on machine characteristics and performance tests". Journal of Intelligent Manufacturing. Online first (July 2009)

<http://dx.doi.org/10.1007/s10845-009-0286-6>

Universitat de Girona Department of Mechanical Engineering and Industrial Construction, Girona, Spain

Centro de Innovacion en Diseño y Tecnología, Tecnológico de Monterrey, Nuevo León Mexico

Rutgers University Department of Industrial and Systems Engineering, Piscataway NJ, USA

Received: 24 July 2008; Accepted: 18 June 2009; Published online: 04 July 2009

Abstract

Economic globalization, together with heightened market competition and increasingly short product life cycles are motivating companies to use advanced manufacturing technologies. Use of high speed machining is increasingly widespread; however, as the technology is relatively new, it lacks a deep-rooted knowledge base which would facilitate implementation. One of the most frequent problems facing companies wishing to adopt this technology is selecting the most appropriate machine tool for the product in question and own enterprise characteristics. This paper presents a decision support system for high speed milling machine tool selection based on machine characteristics and performance tests. Profile machining tests are designed and conducted in participating machining centers. The decision support system is based on product dimension accuracy, process parameters such as feed rate and interpolation scheme used by CNC and machine characteristics such as machine accuracy and cost. Experimental data for process error and cycle operation time are obtained from profile machining tests with different geometrical feature zones that are often used in manufacturing of discrete parts or die/moulds. All those input parameters have direct impact on productivity and manufacturing cost. Artificial neural network models are utilized for decision support system with reasonable prediction capability.

Keywords: Decision support system; High speed machining; Machine tool selection

Capítulo 7. Conclusiones y desarrollos futuros

7.1. Conclusiones

Cada uno de los artículos presentados en el capítulo anterior recoge las principales conclusiones de las distintas fases de la investigación. Aun así, se ha considerado conveniente recoger y recopilar, en este capítulo, dichas conclusiones agregadas, para ofrecer una visión global de los resultados conseguidos.

Como punto de partida, la revisión del estado del arte y la literatura existente, así como un análisis general de su evolución, permite constatar la creciente importancia del mecanizado de alta velocidad y la gran cantidad de líneas de investigación existentes relacionadas con este tema. Sin embargo, muchas de estas líneas de investigación están muy focalizadas en (a) el estudio de la dinámica de las máquinas herramienta para alta velocidad, con el objetivo de mejorar sus prestaciones, (b) la definición de diferentes tipos de recorridos de herramienta (*toolpaths*) que permitan mejorar el proceso y la calidad superficial de las piezas mecanizadas, (c) el proceso de formación de la viruta en el mecanizado de alta velocidad, y sus implicaciones en el estado superficial final de las piezas así como en el tiempo de vida de la herramienta, (d) otros aspectos, todos ellos con enfoques sobre temas muy concretos dentro del ámbito del mecanizado de alta velocidad.

Aun siendo muy importante y necesario seguir explorando en estas líneas para un desarrollo a medio-largo plazo del proceso, los resultados de las investigaciones correspondientes a este ámbito no tienen una aplicación directa y a corto plazo para los usuarios de los centros de mecanizado, sino más bien para los diseñadores y fabricantes de los mismos. Contrariamente a las líneas antes mencionadas, esta tesis pretende ofrecer una mirada al proceso de mecanizado de alta velocidad desde una perspectiva más general, de manera que los resultados obtenidos tengan una utilidad directa para los usuarios de los centros de mecanizado para alta velocidad. Esta visión más generalista se detecta en pocos trabajos, como el realizado por Ezugwu et al. (2005), aunque el objetivo final del mismo difiere considerablemente de el de esta tesis.

Es necesario hacer mención al alcance del trabajo que se presenta: es obvio y lo constatan varios autores (Dagiloke et al., 1995; Raj Aggarwal, 1995; Altan et al., 2001; Vivancos et al., 2004) que hay muchos factores que tienen influencia sobre los resultados finales de un proceso de mecanizado, incluso más si se trata de mecanizado de alta velocidad. Sin embargo, este trabajo se basa en el análisis de un conjunto finito de factores, debido a la imposibilidad de hacer un análisis exhaustivo que cubra todos los factores con posible influencia sobre el proceso. Puesto que gran parte del desarrollo presentado se basa en los resultados de un trabajo empírico, la duración y el coste de los experimentos necesarios obliga a limitar el número de factores objeto del análisis.

Dicho esto, a continuación se analizan y discuten los principales resultados obtenidos del trabajo realizado.

Tal como se menciona anteriormente, esta tesis gira en torno al análisis del efecto de un conjunto determinado de factores (parámetros de corte, tipo de interpolación utilizada en la definición de los recorridos de la herramienta y tipo de sistema de sujeción utilizado) en los resultados del mecanizado de alta velocidad. Una vez concluida la investigación, procede determinar si los factores escogidos son realmente determinantes o si hubiera sido conveniente utilizar otros. Pues bien, en lo que se refiere a los parámetros de corte –avance, pasada axial y radial y velocidad de corte-, cabe decir que su efecto sobre los resultados es indiscutible: un aumento del avance revierte necesariamente en una disminución del tiempo de ciclo, mientras que el aumento de la profundidad de pasada, tanto axial como radial, disminuye la calidad final de las piezas. Sin embargo, aunque en el transcurso de esta tesis se ha desarrollado un algoritmo que permite la optimización de todos los parámetros de corte, para el trabajo empírico se ha trabajado a profundidad de pasada (axial y radial) constante y se ha decidido únicamente analizar los efectos de las variaciones en el avance. ¿Se trata de una decisión acertada? ¿O esta limitación supone un sesgo importante en los resultados obtenidos? Pues bien, esta aproximación, utilizada también por otros autores (Axinte y Dewes, 2002; Ezugwu et al., 2005), ha resultado acertada tal como demuestra la aplicación del algoritmo de optimización: el hecho de utilizar pasadas axiales y/o radiales pequeñas está implícito en la definición del mecanizado de alta velocidad, y las posibles variaciones que se podrían realizar suponen diferencias mínimas. Además, la profundidad de pasada es uno de los parámetros que más limitados están por la potencia de la máquina-herramienta que se utiliza, así como también por la geometría de la herramienta, por lo tanto es un factor en el que el planificador de procesos de mecanizado de alta velocidad tiene poco margen de maniobra.

En lo que se refiere al tipo de interpolación utilizada, la decisión de discriminar entre interpolación lineal y circular también ha aportado resultados interesantes. Aunque la primera es la más comúnmente utilizada en la definición de las trayectorias de la herramienta, la segunda se ha revelado como muy favorable según los resultados concretos que se discutirán más adelante. Aun así, la importancia creciente de las interpolaciones polinomiales (tipo *spline*, NURBS) es un hecho innegable. Existe una razón práctica para no haber considerado este tipo de interpolación en el trabajo experimental, pues algunos de los controles numéricos utilizados en la experimentación no proporcionaban esta posibilidad y, por lo tanto, no hubiera sido posible obtener el número necesario de datos para sacar conclusiones con la suficiente confianza. Sin embargo, la extensión del trabajo realizado incluyendo este tipo de interpolación ofrecería resultados muy útiles.

Finalmente, la consideración de los dos tipos de sistemas de sujeción ha permitido obtener resultados interesantes, sin embargo, de todos los factores analizados, este es el menos generalizable, puesto que, en cuanto a sistemas de sujeción, existe comercialmente una gran variedad, e incluso distintas patentes de sistemas de sujeción especiales.

Otra consideración importante es evaluar si los parámetros escogidos para la selección de los centros de mecanizado, tiempo de ciclo y precisión dimensional, se han revelado útiles en el análisis realizado. Pues bien, ambos parámetros han presentado una sensibilidad destacable a la variación de los factores antes mencionados (avance, tipo de interpolación y tipo de sistema de sujeción), lo cual ha permitido visualizar de forma clara la influencia de cada uno de los factores.

En lo que se refiere al tiempo de ciclo, se trata de un parámetro bastante común en la evaluación de procesos de mecanizado y en el estudio de la planificación de procesos. Autores como Monreal y Rodríguez (2003), Toh (2005) o Siller et al. (2006) utilizan el tiempo de ciclo como un medio para evaluar las diferentes estrategias de recorrido de la herramienta (*toolpaths*), mientras que López de Lacalle et al. (2002), Vivancos et al. (2004), Bouzid (2005) o So (2007) utilizan el tiempo de ciclo como una herramienta para la planificación de procesos. En cambio, la medida de la precisión dimensional es mucho menos habitual, y puede encontrarse sólo en unos pocos papers como Terrier et al. (2004) o Abukhshim et al. (2006), mientras que el parámetro que suele tomarse como referencia para medir la calidad final de las piezas mecanizadas es la rugosidad superficial, Ra. Teniendo en cuenta que el mecanizado de alta velocidad, por su propia descripción, tiende a proporcionar piezas con un buen acabado superficial, y considerando que para muchos usuarios la medida

de la precisión dimensional puede ser un parámetro muy importante, conclusiones como las obtenidas de este análisis, y que se discutirán más adelante, pueden tener un impacto considerable sobre los usuarios del proceso.

La optimización de los parámetros de corte para el mecanizado de alta velocidad ha proporcionado dos tipos de resultados importantes: como parte de la investigación que se presenta en esta tesis, ha facilitado la selección de los valores óptimos a aplicar a los distintos parámetros de corte en el trabajo experimental, valores que han demostrado ser adecuados para el tipo de proceso en cuestión. Pero además, el algoritmo diseñado puede aplicarse de forma independiente, facilitando la planificación de procesos una vez determinado el centro de mecanizado más adecuado para una determinada aplicación. El algoritmo diseñado destaca también por ser básicamente analítico, mientras que la mayoría de estudios existentes sobre este ámbito se basan principalmente en un trabajo empírico (Bouid, 2005; Flores et al., 2007). Finalmente, el hecho de que el algoritmo optimice básicamente el tiempo de ciclo (y por ende, el coste de la operación teniendo en cuenta la tasa horaria), ha sido de gran utilidad, puesto que el tiempo de ciclo es precisamente uno de los parámetros a considerar en la definición de una metodología para la selección de centros de mecanizado para alta velocidad.

7.1.1. Resultados del trabajo experimental

El experimento diseñado en el marco de esta tesis destaca por su simplicidad: frente a otras superficies o perfiles estándar para el testeo de máquinas-herramienta, como la superficie Mercedes u otras similares (López de Lacalle et al., 1999) o bien piezas muy simplificadas como las utilizadas por Yih-fong (2007) o Schmitz et al. (2008), el perfil utilizado tiene la ventaja de presentar las diferentes geometrías a analizar (diferentes tipos de concavidades, diferentes radios de curvatura) en sólo dos dimensiones, facilitando que se puedan hacer varios experimentos a partir de un único bloque de material en bruto. Además, las adaptaciones realizadas sobre el perfil original propuesto por Mecof, han enriquecido los resultados del análisis, permitiendo observar también los efectos de los factores analizados en geometrías como aristas vivas, no existentes en el perfil original, y permitiendo tratar la deformación debida a la flexibilidad de la herramienta como un factor negligible, al agrandar la pieza y mecanizarla con una herramienta de diámetro considerable. Además, el hecho de mecanizar en dos dimensiones simplifica

enormemente las tareas de medición final de la superficie, disminuyendo así el coste total de la medición.

Igualmente simple es la metodología utilizada para la medición de la aceleración de los centros de mecanizado. Un mecanizado en vacío, sin coste alguno de materiales o desgaste de la herramienta, ha permitido obtener un valor suficientemente aproximado y que, por haber utilizado la misma metodología en todos los centros, ha permitido comparar los resultados obtenidos en los diferentes experimentos.

En cuanto a los resultados obtenidos en la medición del tiempo de ciclo, destacan dos conclusiones importantes: la primera es que, aunque el avance es el factor que mayor influencia tiene sobre este parámetro -cuanto mayor es el avance, menor es el tiempo de ciclo-, esta diferencia es significativamente menor a la que cabría esperar, puesto que al tratarse de una superficie de mecanizado esculpida, con grandes variaciones de pendiente y cambios de sentido en la dirección Z, el alcance programado se alcanza en muy pocas zonas, y este efecto es aún más destacable cuando el avance programado es mayor. Por este motivo, la disminución en el tiempo de ciclo no es proporcional al aumento del avance programado.

Otra conclusión importante es el efecto que tienen sobre el tiempo de ciclo los diferentes tipos de interpolación utilizados en la definición de los recorridos de la herramienta, y este resultado puede tener un efecto importante para los usuarios de los centros de mecanizado. Aunque de forma prácticamente universal estos usuarios tienden a utilizar la interpolación lineal, se demuestra que la utilización de la interpolación circular ofrece claras ventajas respecto a la disminución del tiempo de ciclo, sobre todo para avances más elevados, obteniéndose tiempos de ciclo incluso un 7% más largos con la interpolación lineal respecto a la circular. Además, la utilización de este tipo de interpolación permite obtener programas de control numérico con un menor número de bloques y, aunque con las capacidades actuales de los controles numéricos la longitud de los programas supone cada vez menos un problema, sí que es cierto que un programa más corto resulta más manejable, más rápido de transferir y, por ende, más eficiente.

El análisis de los resultados de las mediciones de la precisión dimensional en los diferentes experimentos permite obtener también algunos resultados destacables. El primero es que el sistema de sujeción de la herramienta de tipo térmico proporciona mejores resultados en cuanto a la precisión dimensional que el de tipo mecánico. Esta diferencia se percibe especialmente en el mecanizado de las geometrías

más complejas, como pueden ser las aristas vivas, que exigen un cambio brusco en la dirección de la velocidad, siendo muy exigentes tanto para la dinámica de la máquina-herramienta como por la vibración que pueda producirse en la herramienta debido a las aceleraciones y deceleraciones. Así pues, el sistema de sujeción térmico se muestra más capaz de absorber este tipo de movimiento.

Cabe destacar el efecto del avance sobre el error dimensional en las piezas mecanizadas. Aunque a partir de los experimentos presentados en Albertí et al. (2007), realizados únicamente en dos centros de mecanizado de características muy distintas, no se puede concluir una relación clara entre la variación del avance y su efecto en la precisión dimensional, sí que se observan correlaciones al comparar los experimentos realizados en los cinco centros de mecanizado (Albertí et al., 2009). En general, el avance más elevado (5m/min) proporciona mayor precisión dimensional que el de 3,5m/min, aunque esta variación difiere significativamente en función de las características de los centros de mecanizado. En los centros de mecanizado MC2 y MC4 se han obtenido los menores errores, mientras que en los centros MC3 y MC5 los errores han sido más considerables. Se observa, pues, que contrariamente a lo que cabría esperar, el error dimensional no tiene una relación clara con el volumen de mecanizado (se espera que los centros de mecanizado de menor dimensión tengan una precisión superior) sino más bien con la aceleración del mismo: los centros con aceleraciones superiores producen piezas con más error dimensional. Menos interesante es la comparación con el centro MC1 por tratarse del único que no dispone de sonda de control de temperatura.

Finalmente, analizando el efecto del tipo de interpolación sobre la precisión dimensional de las piezas mecanizadas, se observa una pequeña reducción del error cuando se utiliza la interpolación circular. Este efecto, unido a la disminución en el tiempo de ciclo obtenida con este tipo de interpolación, la presenta como una alternativa válida, que suele estar disponible en todos los sistemas CAM y controles numéricos (no se puede decir lo mismo de las interpolaciones polinomiales) y que representa una mejora substancial tanto por la calidad de la pieza fabricada como por la economía de la fabricación.

Es interesante también analizar la variación de la precisión dimensional en las diferentes zonas de la pieza, es decir, el comportamiento en distintos tipos de geometría. Se observa que el mayor error se produce en las zonas correspondientes a curvas abiertas (zonas A1 y A2), tanto cóncavas como convexas, seguidas de la zona correspondiente a un vértice (zona C), cuyo error también es superior al correspondiente a las

curvas más cerradas. Concretamente, el menor error se produce en la zona curva cerrada convexa (zona B1). Tal como se ha comentado anteriormente, los avances más elevados proporcionan mayor precisión dimensional. Este es el motivo por el cual las curvas abiertas se mecanizan con mayor precisión que las cerradas: la herramienta puede llegar a alcanzar un avance mayor, más cercano al programado que en el caso de las curvas cerradas.

A partir de la realización de este análisis se detecta el interés que hubiera tenido el hacer mediciones también sobre una zona correspondiente a una recta, para poder comparar así los errores de las superficies complejas con otra más sencilla.

7.1.2. Sistema de selección de centros de mecanizado para alta velocidad

La definición de un algoritmo para la selección de centros de mecanizado y su modelización mediante redes neurales, utilizando el software *Matlab*, ha permitido obtener una metodología sencilla y fácilmente utilizable por parte de los usuarios de dichos centros.

El algoritmo de selección incorpora varios tipos de variables, clasificadas según su relación con el producto, la máquina o el proceso. Entre estas variables se encuentran las analizadas en el trabajo experimental anteriormente mencionado, pero también considera otras variables, algunas de ellas implícitas en cada modelo de centro de mecanizado para alta velocidad. De las variables estudiadas en el trabajo experimental, la aceleración del centro de mecanizado forma parte de las variables de máquina, el avance, el tipo de interpolación y el sistema de sujeción de la herramienta utilizado forman parte de las variables de proceso (aunque este último podría considerarse también como una variable de máquina), y la geometría de la pieza forma parte de las variables de producto.

El algoritmo de selección se basa en descartar inicialmente todos los centros de mecanizado que no cumplen las especificaciones requeridas para la fabricación de una determinada pieza, en cuanto a su volumen de mecanizado disponible o bien en cuanto a la precisión necesaria, comparando el error máximo admitido en la pieza con el valor nominal definido por el fabricante del centro de mecanizado. Una vez hecha esta primera selección, el algoritmo plantea dos grandes cuestiones:

- a. ¿El error que se va a producir debido a la configuración del proceso (E_p), es menor al error admisible en la pieza? El primero, que se considera una función del volumen de la pieza, el tipo de interpolación utilizada y el sistema de sujeción de la herramienta, se calcula mediante una primera red neural, ANN₁.
- b. ¿El tiempo de ciclo para la fabricación de la pieza en el centro de mecanizado en cuestión, es aceptable? Es decir, ¿este tiempo de ciclo permite hacer la pieza a precio de mercado?. El tiempo de ciclo, que se calcula mediante una segunda red neural, ANN₂, es función del avance, el tipo de interpolación y la aceleración del centro de mecanizado.

A partir de la respuesta afirmativa a estas dos preguntas, puede calcularse el coste total del proceso y, si este está dentro de un rango aceptable, el centro de mecanizado analizado puede pasar a formar parte de un listado de centros posibles de entre los cuales se escogerá el de menor coste.

Este algoritmo, aun tratándose de un proceso simplificado que no puede tener en cuenta todas las variables que intervienen en el mecanizado de alta velocidad, pretende reproducir el proceso de reflexión que un planificador de procesos llevaría a cabo, en base a su experiencia y *know-how*, pero aportándole la objetividad que proporciona la toma de decisiones en función de criterios objetivos, y basándose en datos reales obtenidos mediante un trabajo experimental.

La modelización en *Matlab* de las redes neurales, a partir de dos redes multicapa con estructuras 5-5-1 y 3-5-1 respectivamente, y entrenadas mediante los algoritmos de Levenberg Marquart la primera (predicción del error del proceso) y Resilient Backpropagation la segunda (predicción del tiempo de ciclo), ha permitido obtener resultados aceptables en ambos casos, aunque en el primero (la predicción del error) los resultados son mucho más fiables puesto que se dispone de un número significativamente mayor de datos para el entrenamiento y testeo de la red que en el segundo caso.

Frente a otros posibles métodos de modelización, como por ejemplo los analíticos o la simulación por elementos finitos, las redes neurales demuestran algunas ventajas a considerar. Mientras que en los métodos analíticos se suelen asumir hipótesis de simplificación, así como se omiten factores que pueden afectar el resultado final del proceso, las redes neurales pretenden conseguir representaciones parecidas a las humanas para la resolución de problemas complejos que implican variables interrelacionadas, por lo tanto permiten considerar todas las

variables (García-Romeu, 2005). En cuanto a la simulación mediante el método de los elementos finitos, aun siendo una metodología ampliamente utilizada, esta requiere de un conocimiento en profundidad del método, que permita seleccionar adecuadamente las condiciones de contorno e interpretar a posteriori los resultados obtenidos.

Las redes neurales, en cambio, una vez implementadas, son fáciles de utilizar por un usuario sin experiencia, lo que las hace idóneas para obtener una primera solución de partida a la que, a un usuario inexperto, le hubiera costado mucho llegar. Cabe decir también que un paso fundamental en la utilización de las redes neurales es la obtención de los datos necesarios de entrada y salida para la etapa de entrenamiento. La obtención de estos datos puede realizarse mediante modelos de proceso como los comentados anteriormente (analíticos o por elementos finitos), o bien, como en el caso que se presenta en esta tesis, mediante experimentación real del proceso, en este caso de mecanizado de alta velocidad. Si se obtienen mediante el primer método se evita una experimentación que suele consumir mucho tiempo y ser costosa, mientras que si se obtienen mediante experimentación manteniendo las mismas condiciones, la información extraída es más precisa.

7.1.3. Aplicabilidad de los resultados obtenidos

El sistema de soporte a la toma de decisiones para la selección de centros de mecanizado de alta velocidad puede tener dos tipos de utilidades para la empresa. La primera, en el análisis de inversiones, para la selección del centro de mecanizado más adecuado teniendo en cuenta la tipología más habitual de piezas que fabrica una determinada empresa. En este caso sería necesario aplicar el algoritmo a las diferentes máquinas-herramienta que se barajen como posibles adquisiciones.

La segunda posibilidad de utilización del sistema de selección se encuentra en la planificación de procesos, para seleccionar, de entre las máquinas que forman parte del parque de una determinada empresa, la más conveniente para una aplicación. En este caso, el algoritmo de selección formaría parte de un sistema más amplio, de tipo CAPP (*Computer Aided Process Planning*) y sería conveniente ampliarlo, añadiéndole otros motores de decisión que permitieran, por ejemplo, tener en cuenta la carga de cada uno de los centros de mecanizado disponibles en el taller para la búsqueda de un óptimo global, para el conjunto de piezas y centros de mecanizado, y no un óptimo local para

cada pieza como se busca en esta tesis. En este sentido, el grupo de investigación al amparo del cual se ha realizado esta tesis, dispone de varias líneas de investigación sobre este ámbito, como lo demuestran publicaciones recientes como Ciurana et al. (2003), Vidal et al. (2005) o Ciurana et al. (2008).

La principal ventaja de este sistema de selección frente a otros sistemas como los definidos en Tabucanon et al. (1994), Yurdakul (2004) o Tansel Iç y Yurdakul (2009), es la simplicidad de su aplicación, para la cuál es suficiente con disponer de los datos básicos sobre el proceso, la pieza y el centro de mecanizado. Futuros desarrollos de este trabajo deberían permitir adaptar los motores de cálculo a un programa que incluyera formularios para la introducción de los datos, de una forma ágil y amigable para el usuario.

Finalmente, cabe comentar la universalidad del sistema de selección definido. Aunque para su diseño se ha utilizado un conjunto finito de centros de mecanizado, el sistema puede aplicarse a otros centros siempre y cuando sus características sean similares a las de los centros testeados en este caso. Aunque inicialmente se había planteado la posibilidad de diseñar un algoritmo de selección orientado a escoger entre estos 5 centros, y por lo tanto restringido a las características de los mismos, finalmente se consideró más interesante no basar el sistema en modelos de máquina-herramienta sino en características genéricas de las mismas, que pueden encontrarse en muchos de los centros de mecanizado disponibles en el mercado, obteniéndose así un sistema que no llega a la obsolescencia en el momento que los modelos utilizados para este trabajo dejen de fabricarse. Sin embargo, es de todos conocida la rápida evolución que se produce en el diseño y fabricación de máquinas-herramienta, lo cual exigirá en el futuro una actualización de los datos de manera que el sistema de selección mantenga su actualidad.

7.2. Contribuciones de la tesis

A partir de los artículos aportados y de los resultados comentados en el apartado anterior, se pueden resaltar los aspectos originales e innovadores de esta tesis respecto a otros trabajos existentes:

§ Se ha realizado una adaptación de los modelos de Halevi y Weill (1995) y Vidal et al. (2005) al fresado de alta velocidad.

- § Se ha definido una nueva pieza test, aplicando modificaciones de forma y tamaño sobre un perfil existente propuesto por el fabricante de máquinas-herramienta Mecof.
- § Se ha realizado un trabajo experimental que estudia la relación de algunos factores poco trabajados, como el tipo de interpolación, sobre parámetros también poco estudiados, como la precisión dimensional (la mayoría de trabajos existentes analizan el acabado superficial).
- § Se ha definido un algoritmo para la selección de centros de mecanizado de alta velocidad que tiene en cuenta aspectos tecnológicos y económicos del proceso de mecanizado de alta velocidad.
- § Se han aplicado las redes neurales a la modelización del proceso de mecanizado, para la posterior selección de centros de mecanizado para alta velocidad.

De esta forma ha sido posible obtener las siguientes contribuciones al proceso de selección de centros de mecanizado para alta velocidad:

- § Las variables velocidad de avance y tipo de interpolación tienen influencia sobre el tiempo de ciclo del mecanizado: en el primer caso, un aumento de la velocidad de avance provoca una disminución menor a la proporcional en el tiempo de ciclo. En el segundo caso, el tipo de interpolación circular redundante en un menor tiempo de ciclo.
- § Las variables velocidad de avance, tipo de interpolación y tipo de sistema de sujeción de la herramienta tienen influencia sobre la precisión dimensional de las piezas mecanizadas: este parámetro es mayor utilizando interpolación circular y sistema de sujeción de herramienta térmicos. En cambio, su influencia sobre la precisión dimensional es mucho menos significativa y varía en función del tipo de geometría.
- § Existe una relación entre los parámetros estudiados, tiempo de ciclo y precisión dimensional, y los criterios de selección de centros de mecanizado de alta velocidad: el criterio de productividad tiene una relación directa con el tiempo de ciclo, mientras que los criterios tecnológicos y de calidad están relacionados con la precisión dimensional de las piezas.
- § Las redes neurales son válidas como forma de modelizar un sistema de selección de centros de mecanizado de alta velocidad. La red ha sido entrenada con resultados experimentales reales lo que refuerza esta afirmación.

Con estas aportaciones se considera que los objetivos iniciales de la tesis, descritos en el *Capítulo 1* de este documento, se han alcanzado:

- § Se ha analizado la importancia de diferentes variables del proceso de mecanizado sobre el error dimensional de las piezas y sobre el tiempo de ciclo. Este análisis ha permitido seleccionar las variables más influyentes.
- § Se ha investigado experimentalmente tanto el error dimensional de las piezas mecanizadas como la variación del tiempo de ciclo, obteniendo en ambos casos conclusiones relevantes.
- § Se ha elaborado una metodología de selección de centros de mecanizado para alta velocidad, considerando las variables seleccionadas y utilizando los resultados del trabajo experimental. Esta metodología es fácilmente aplicable en la empresa puesto que únicamente requiere de conocimientos básicos.

7.3. Trabajos futuros

Para finalizar el trabajo, una vez se han valorado y expuesto todas las aportaciones, se presentan algunas propuestas para establecer futuros enfoques o trabajos de investigación:

- § Extender el trabajo experimental de forma que permita contemplar nuevos niveles de los factores ya analizados. Para el caso del tipo de interpolación, sería interesante observar los resultados obtenidos de la aplicación de polinomios, mientras que para el tipo de sistema de sujeción se podrían probar algunos de los sistemas patentados que existen en la actualidad.
- § Extender el trabajo experimental de forma que permita contemplar nuevas variables como la estructura del centro de mecanizado o el tipo de herramienta.
- § Aplicar la misma metodología al mecanizado de aceros, para poder observar las diferencias existentes con el caso del mecanizado de aluminio.
- § Implementar el sistema de selección de centros de mecanizado en una herramienta informática amigable para el usuario.
- § Actualizar, de forma más o menos continua, los datos experimentales en los que se basa el sistema de selección, realizando experimentos con los centros de mecanizado más punteros que vayan apareciendo en el mercado.

Capítulo 8. Referencias

Abukhshim, N.A., Mativenga, P.T., Sheik, M.A. (2006): "Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining". *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46, 782-800.

Alam, M.R., Lee, K.S., Rahman, M., Sankaran, K.S. (2002): "Decision algorithm for selection of high-speed machining, EDM or a combination for the manufacture of injection moulds" *International Journal of Production Research* 40 (4) 845-872.

Albertí, M., Ciurana, J., Casadesús, M. (2005): "A system for optimising cutting parameters when planning milling operations in high speed machining" *Journal of Materials Processing Technology*, 168, 25-35.

Albertí, M., Ciurana, J., Rodríguez, C.A. (2006): "Analysis of cycle time as a function of manufacturing conditions in high speed milling of aluminum alloys". *Fifth international conference on high speed machining, March 14-16, Metz, France*.

Albertí, M., Ciurana, J., Rodríguez, C. A. (2007): "Experimental analysis of dimensional error vs. cycle time in high speed milling of aluminium alloy". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47(2), 236-246.

Albertí, M., Ciurana, J., Rodríguez, C. A., Özel, T. (2009): "Design of a decision support system for machine tool selection based on machine characteristics and performance tests". *Journal of Intelligent Manufacturing*. In press.

Almandoz, X. (1999): "La máquina de alta velocidad, requisitos y nuevas estructuras de máquina". *Información de máquinas-herramienta, equipos y accesorios*, 251B.

Altan, T., Lilly, B.W., Kruth, J.P., Leuven. K.U., König, W., Tönshoff, H.K., Luttermelt, C.A., Khairy, A.B. (1993): "Advanced techniques for die and mould manufacturing. Keynote paper". *Annals of the CIRP* 42, 707-716.

- Altan, T.; Lilly, B.; Yen, Y.C. (2001): Manufacturing of Dies and Molds. *Annals of the CIRP 50*, 405-423.
- Antony, J. (2003): "Design of experiments for Engineers and Scientists". *Butterworth Heinemann, London*.
- Aranceta, J., Uribe-Etxeberria, R., Peñagaricano, J.M., Sabalza, X., Hernández, J. (1999): "Controles numéricos de nueva generación". *Información de máquinas-herramienta, equipos y accesorios, 251B*.
- Arezoo, B., Ridgway, K., Al-Ahmari, A.M.A. (2000): "Selection of cutting tools and conditions of machining operations using an expert system". *Computers in Industry 42 (1)* 43–58.
- Arnone, M. (2000): Mecanizado de Alta Velocidad y Gran Precisión. *Ed. El Mercado Técnico, Bilbao*.
- Arazola, P.J., Aristimuño, P., Aperribay, J., López de Lacalle, L.N., Lamikiz, A., Sasia, E., Pérez, J., Etxeberria, J., López, P. (1999): "Fresado a alta velocidad de aceros templados". *Información de máquinas-herramienta, equipos y accesorios, 251B*.
- Arslan, M.C., Çatay, B., Budak, E. (2004): A decision support system for machine selection". *Journal of Manufacturing Technology Management 15 (1)* 101-109.
- Ashley, S. 1995: "High-Speed Machining Goes Mainstream". *Mechanical Engineering 117 (5)* 56-61.
- Aspinwall, D.K., Dewes, R.C., Burrows, J.M., Paul, M.A. (2001): Hybrid High Speed Machining (HSM): System Design and Experimental Results for Grinding/HSM and EDM/HSM. *Annals of the CIRP 50 (1)* 145-148.
- Axinte, D.A., Dewes, R.C. (2002): "Surface integrity of hot work tool steel after high speed milling – experimental data and empirical models". *Journal of Materials Processing Technology 127*, 325-335.
- Ayag, A., & Özdemir, R. G. (2006): "A Fuzzy AHP approach to evaluating machine tool alternatives". *Journal of Intelligent Manufacturing, 17(2)*, 179–190.
- Bagard, P., Palleau, M. (1995): "On gagne à les usines à grande vitesse". *CETIM Informations, 142 (1995)*.

- Baskar, N., Asokan, P., Saravanan, R., Prabhakaran, G. (2006): "Selection of optimal machining parameters for multi-tool milling operations using a memetic algorithm". *Journal of Materials Processing Technology*, 174, 239–249.
- Bock, L. (1991): "Material process selection methodology: design for manufacturing and cost using logic programming". *Cost Engineering*, 33 (5), 9-14.
- Bokhorst, J.A.C., Slomp, J., Suresh, N.C. (2002): "An integrated model for part-operation allocation and investments in CNC technology". *International Journal of Production Economics* 75, 267-285.
- Bouaziz, Z., Ben Younes, J., Zghal, A. (2004): "Methodology of machining costs evaluation for die and mould manufacturing". *Journal of Materials Processing Technology* 152, 237–245.
- Bouzid, W. (2005): "Cutting parameter optimization to minimize production time in high speed turning". *Journal of Materials Processing Technology*, 161, 388-395.
- Brown, S.M., Wright, P.K. (1998): A Progress Report on the Manufacturing Analysis Service, an Internet-Based Reference Tool. *Journal of Manufacturing Systems*, 17 (5) 389-398.
- Burbidge, J.L. (1975): *The Introduction of Group Technology*, William Heinemann, London.
- Campbell, C.E., Bendersky, L.A., Boettinger, W.J., Ivester, R. (2006): "Microstructural characterization of Al-7075-T651 chips and work pieces produced by high-speed machining". *Materials Science and Engineering, A* 430 (1–2), 15–26.
- Chan, F., & Swarnkar, R. (2006): "Ant colony optimization approach to a fuzzy goal programming model for a machine tool selection and operation allocation problem in an FMS". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 22, 353–362.
- Chien, W.T., Tsai, C.S. (2003): "The investigation on the prediction of tool wear and the determination of optimum cutting conditions in machining 17-4PH stainless steel". *Journal of Materials Processing Technology*, 140, 340-345.

Chiu G, Tomizuka M (2001): "Contouring control of machine tool feed drive systems: a task coordinate frame approach". *IEEE Trans Control Systems Technol* 9(1)130–139.

Choudhury, S.K., Appa Rao, I.V.K. (1999): Optimization of cutting parameters for maximizing tool life, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 39, 343–353.

Chtourou, H., Masmoudi, W., Maalej, A. (2005): An expert system for manufacturing systems machine selection. *Expert Systems with Applications* 28, 461-467.

Chu, C.H., Huang, W.N., Hsu, Y.Y. (2008): "Machining accuracy improvement in five-axis flank milling of ruled surfaces". *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 48, 914-921.

Chung, C., Peng, Q. (2004): The selection of tools and machines on web-based manufacturing environments. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44, 317-326.

Cimren, E., Budak, E., & Catay, B. (2004). Development of a machine tool selection system using analytic hierarchy process. *Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*, 4.

CIRP Working Group 'Modelling of Machining Operations' (1998): Van Luttervelt, C.A., Childs, T.H.C., Jawahir, L.S., Klocke, F., Venuvinod, PK., with contributions from: Altintas, Y., Armarego, E., Grabec, I., Leopold, J., Lindstrom, B., Lucca, D., Obicawa, T., Shirakashi, Sato, H.; "Present Situation and Future Trends in Modelling of Machining Operations Progress Report of the CIRP Working Group 'Modelling of Machining Operations'", *Annals of the CIRP* 47/2, 587-626.

Ciurana, J., G. Romeu, M.L., Castro, R. De, Albertí, M. (2003): "A system based on machined volumes to reduce the number of route sheets in process planning". *Computers in Industry* 51 (1) 41–50.

Ciurana, J., Quintana, G., G.-Romeu, M.L. (2008): "Estimating the cost of vertical high speed machining centres, a comparison between multiple regression analysis and neural networks approach", *International Journal of Production and Economics*, 115 (1) 171 – 178.

Coelho, R.T., Silva, L.R., Braghini, A., Bezerra, A.A. (2004): "Some effects of cutting edge preparation and geometric modifications when

turning INCONEL 718™ at high cutting speeds”. *Journal of Materials Processing Technology* 148, 147-153.

Dagiloke, I.F., Kaldos, A., Douglas, S., Mills, B. (1995): “High-speed machining: an approach to process analysis”. *Journal of Materials Processing Technology* 54, 82-87.

Davim, J.P., Gaitonde, V.N., Karnik, S.R. (2008): “Investigations into the effect of cutting conditions on surface roughness in turning of free machining steel by ANN models”. *Journal of Materials Processing Technology* 205, 16-23.

Dewes, R.C., Aspinwall, D.K. (1997): “A review of ultra high speed milling of hardened steels”. *Journal of Materials Processing Technology* 69, 1-17.

Dhamjia, D., Koonce, A., Judd, R.P. (1997): “Development of a unified data meta-model for CAD-CAPP-MRP-NC verification integration”, *Comput. Ind. Eng.* 33 (1–2) 19–22.

Doll, W.J., Vonderemse, M.A. (1991): “The evolution of manufacturing systems: Towards the post-industrial enterprise”. *Omega* 19 (5), 401-411.

Dong, J., Yuan, C., Stori, J.A., Ferreira, P.M. (2004): “Development of a high-speed 3-axis machine tool using a novel parallel-kinematics X-Y table”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 44, 1355–1371.

Dotcheva, M., Millward, H. (2005): “The application of tolerance analysis to the theoretical and experimental evaluation of a CNC corner-milling operation”. *Journal of Materials Processing Technology* 170, 284–297.

Duran, O., Aguilo, J. (2008): “Computer-aided machine-tool selection based on a Fuzzy-AHP approach”. *Expert Systems with Applications*, 34, 1787–1794.

Echapere, R., Esteban, D. (1999): “El mecanizado a alta velocidad (HSM). Perspectiva general”. *Información de máquinas-herramienta, equipos y accesorios* 251B.

El-Mounayri, H., Kishawy, H., Briceno, J. (2005): “Optimization of CNC ball end milling: a neural network-based model”. *Journal of Materials Processing Technology* 166, 50-62.

Erkorkmaz, K., Altintas, Y. (2001): "High speed CNC system design. Part I: jerk limited trajectory generation and quintic spline interpolation". *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 41, 1323–1345.

Ezugwu, E.O., Fadare, D.A., Bonney, J., Da Silva, R.B., Sales, W.F. (2005): "Modelling the correlation between cutting and process parameters in high-speed machining of Inconel 718 alloy using an artificial neural network". *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45, 1375–1385.

Fallböhmer, P., Rodríguez, C.A., Özel, T., Altan, T (2000): "High-speed machining of cast iron and alloy steels for die and mold manufacturing". *Journal of Materials Processing Technology* 98, 104-115.

Flores, V. (2006): "Impact of jerk on the cycle time and dynamic error in high-speed machining centers". *MS Thesis, Tecnológico de Monterrey, Mexico*.

Flores, V., Ortega, C., Albertí, M., Rodriguez, C.A., Ciurana, J., Elías, A. (2007): "Evaluation and modeling of productivity and dynamic capability performance machining centers". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 33 (3-4) 403 – 411.

García-Romeu, M.L. (2005): "Contribución al estudio del proceso de doblado al aire de chapa. Modelo de predicción del ángulo de recuperación y del radio de doblado final". *Tesis doctoral, ISBN: 84-689-5327-X*.

Geldart, M., Webb, P., Larsson, H., Backstrom, M., Gindy, N., Rask, K. (2003): "A direct comparison of the machining performance of a variac 5 axis parallel kinetic machining centre with conventional 3 and 5 axis machine tools". *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43, 1107–1116.

Georgakellos, D. A. (2005): "Technology selection from alternatives: A scoring model for screening candidates in equipment purchasing". *International Journal of Innovation and Technology Management*, 2(1), 1–18.

Giachetti, R.E. (1998): A decision support system for material and manufacturing selection. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 9, 265-276.

Gopalakrishnan, B., Yoshii, T., & Dappili, S. M. (2004). Decision support system for machining center selection. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 15(2), 144–154.

Granville, C. (1989): “Computer-aided process planning”. *Computer-Aided Engineering* 8 (8) 46–48.

Gu, P., Norrie, D.H. (1995): *Intelligent Manufacturing Planning*, Chapman & Hall.

Haber, R.E., Cantillo, K., Jiménez, J.E. (2005): “Networked sensing for high-speed machining processes based on CORBA”. *Sensors and Actuators A* 119,418-425.

Halevi, G., Weill, R.D. (1995): *Principles of Process Planning. A Logical Approach*, Chapman & Hall.

Han, G.C., Kim, D.I., Kim, H.G., Nam, K., Choi, B.K., Kim, S. (1999): “A High Speed Machining Algorithm for CNC Machine Tools”. *Industrial Electronics Society IECON'99 Proceedings of the 25th Annual Conference of the IEEE. Vol. 3, 1493-1497.*

Ibaraki, S., Kakino, Y., Lee, K., Ihara, Y., Braasch, J., Eberherr, A. (2001): “Diagnosis and compensation of motion errors in NC machine tools by arbitrary shape contouring error measurement. Laser metrology and machine performance V”. *WIT Press, Southampton, UK, Proceedings of LAMDAMAP 01, Birmingham, UK, pp 59–68.*

Jiao, Y., Lei, S., Pei, Z.J., Lee, E.S. (2004): “Fuzzy adaptive networks in machining process modeling: surface roughness prediction for turning operations”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 44, 1643–1651.

Jiménez, M., de Mingo, D., del Real, J.C., Sandes, V. (2001): “Taladrado y Roscado de Alta Velocidad”. *Ed. Izaro Group.*

Juan, H., Yu, S.F., Lee, B.Y. (2003): “The optimal cutting-parameter selection of production cost in HSM for SKD61 tool steels”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture. Design, Research and Application* 43, 679-686.

Jung, J. Y. (2002). Manufacturing cost estimation for machined parts based on manufacturing features. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 13(4), 227–238.

Kaldos, A., Dagiloke, I.F., Boyle, A.(1996): "Computer aided cutting process parameter selection for high speed milling". *Journal of Materials Processing Technology* 61, 219-224 (1996).

Kalpakjian, S., Schmid, S. R. (2001). Manufacturing engineering and technology. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall Inc.

Kaschka, U., Auerbach, P. (2000): Selection and evaluation of rapid tooling process chains with Protool. *Rapid Prototyping Journal*, 6 (1), 60-65.

Keung, K. W., Ip, W. H., & Lee, T. C. (2001): "A genetic algorithm approach to the multiple machine tool selection problem". *Journal of Intelligent Manufacturing*, 12(4), 331-342.

Kim, B., Choi, B. (2002): "Machining efficiency comparison direction-parallel tool path with contour-parallel tool path". *Computer Aided Design*, 34 (2) 89-95.

Kline W, DeVor R, Shareef I. (1982):The prediction of surface accuracy in end milling. *Journal of Engineering for Industry* 104, 272-280.

Korosec, M., Kopac, J. (2008): "Improved surface roughness as a result of free-form surface machining using self-organized neural network". *Journal of Materials Processing Technology* 204, 94-102.

Krajnc, P., Kopac, J. (2004): "Modelrn machining of die and mold tools". *Journal of Materials Processing Technology* 157-158, 543-552.

Kurt, A. (2009): "Modelling of the cutting tool stresses in machining of Inconel 718 using artificial neural networks". *Expert Systems with Applications* 36, 9645-9657.

Layek, A.-M., & Lars, J. R. (2000): "Algorithm based decision support system for the concerted selection of equipment in machining/assembly cells". *International Journal of Production Research*, 38 (2), 323-339.

Lee, H.C., Jeon, G.J. (1999): "Real time compensation of two dimensional contour error in CNC machine tools". *Proceedings of the 1999 IEEE/ASME, Atlanta, September 19-23, pp 623-628.*

Lin, Z.C., Yang, C.B. (1996): "Evaluation of machine selection by the AHP method." *Journal of Materials Processing Technology*, 57, 253-258.

Liu, X.W., Cheng, K., Webb, D., Luo, X.C. (2002): "Prediction of cutting force distribution and its influence on dimensional accuracy in peripheral milling". *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 42, 791–800.

López de Lacalle, N., Arteta, A., López, A., Aranceta, J. (1999): Piezas de ensayos para mecanizado a alta velocidad, *Información de máquinas herramienta, equipos y accesorios*, 251B.

(a) López de Lacalle, L. N., Lamikiz, A., Sánchez, J.A., Arana, J.L. (2002): "Improving the surface finish in high speed milling of stamping dies". *Journal of Materials Processing Technology* 123, 292-302.

(b) López de Lacalle, L. N., Lamikiz, A., Salgado, M.A., Herranz, S., Rivero, A. (2002): "Process planning for reliable high-speed machining of moulds". *International Journal of Production Research* 40 (12) 2789-2809.

López de Lacalle, L. N., Sánchez, J. A., Lamikiz, A. (2004): *Mecanizado de alto rendimiento, procesos de arranque*. (1ª ed.). Bilbao: Ediciones Técnicas Izaro, S.A., Bilbao.

Lu, C. (2008): "Study on prediction of surface quality in machining process". *Journal of Materials Processing Technology* 205, 439-450.

Mackerle, J. (2003): "Finite element analysis and simulation of machining: an addendum. A bibliography (1996–2002)". Literature Alert. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43, 103–114.

Maidagan, X. (1999): "El mecanizado de alta velocidad frente a la electroerosión". *Información de máquinas-herramienta, equipos y accesorios* 251B.

Malakooti, B., & Raman, V. (2000): "An interactive multi-objective artificial neural network approach for machine setup optimization". *Journal of Intelligent Manufacturing*, 11, 41–50.

Mandal, D., Pal, S.K., Saha, P. (2007): "Modeling of electrical discharge machining process using back propagation neural network and multi-objective optimization using non-dominating sorting genetic algorithm-II". *Journal of Materials Processing Technology* 186, 154–162.

Matlab User's Guide, *Neural Network Toolbox*, The MathWorks, 2002.

Monreal, M., Rodriguez, C.A. (2003): "Influence of tool path strategy on the cycle time of high-speed milling". *Computer-Aided Design* 35, 395-401.

Montgomery, D.C. (1991): "Diseño y Análisis de Experimentos". *Grupo Editorial Iberoamérica, México*.

Montgomery, D., Altintas, Y. (1999): "Mechanism of cutting force and surface generation in dynamic milling". *Journal of Engineering for Industry* 113(2), 160–168.

Müller, M, Erdős, G., Xirouchakis, P. (2004): "High accuracy interpolation for 5-axis machining". *Computer-Aided Design* 36, 1379-1393.

Muthukrishnan, N., David, J.P. (2009): "Optimization of machining parameters of Al/SiC-MMC with ANOVA and ANN analysis". *Journal of Materials Processing Technology* 209, 225-232.

NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods, <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/> (ultimo acceso 29.08.09).

Obikawa, T., Shinozuka, J. (2004): "Monitoring of flank wear of coated tools in high speed machining with a neural network ART2". *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 44, 1311–1318.

Oldknow, K.D., Yellowley, I. (2003): "Implementation and validation of 3-dimensional dynamic interpolation using an FPGA based controller". *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43, 937–945.

Önüt, S., Kara, S. S., & Efendigil, T. (2008): "A hybrid fuzzy MCDM approach to machine tool selection". *Journal of Intelligent Manufacturing*, 19(4), 443–453.

Ortega, C. (2004): "Machine tool configuration and performance evaluation—analytic relationship between accuracy and productivity on high speed milling operations. *BS Thesis, Tecnológico de Monterrey, Mexico*.

Ozcelik, B., Bayramoglu, M. (2006): "The statistical modeling of surface roughness in high-speed flat end milling". *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46, 1395–1402.

Özel T., Karpaz Y., (2005): "Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks".

International Journal of Machine Tools and Manufacture. 45 (4 - 5) 467–479

Padilla, P. (1998): “Mecanizado de alta velocidad. Estado del Arte y Potencialidades”. *IMHE, Diciembre 1998*.

Padilla, P., López de Lacalle, N. (1999): “El futuro de la alta velocidad”. *Información de máquinas-herramienta, equipos y accesorios 251B*.

Park, S.C. (2003): “Knowledge capturing methodology in process planning”. *Computer Aided Design* 35 (12) 1109–1117.

Pasko, R., Przybylski, L., Slodki, B. (2002): “High-Speed Machining (HSM)-The effective way of modern cutting”. *International Workshop CA Systems and Technologies*.

Prasad, A.V.S.R.K., Rao, P.N., Rao, U.R.K. (1997): “Optimal selection of process parameters for turning operations in a CAPP system”. *International Journal of Production Research* 35 (6) 1495–1522.

Qiu, H., Cheng, K., Li, Y. (1997): “Optimal circular arc interpolation for NC tool path generation in curve contour manufacturing”. *Computer-Aided Design* 29 (11) 751-760.

Quiao, L.-H., Yang, Z.-B., Wang, B. (1994): “A computer-aided process planning methodology”. *Computers in Industry* 25 (1) 83.

Quintana, G., Ciurana, J., Bacre, D., Rodriguez, C. (2007): “A Cost Model for Vertical High Speed Machining Centres based on the Machine Characteristics”. *Proceedings of the 6th international conference on High Speed Machining, San Sebastián, Spain, Vol 1 pp.41*.

Quintana, G., Ciurana, J., Campa, F.J. (2008): “Chapter 3: Machine Tool Spindles”, *Machine Tools for High Performance Machining*, Ed. Springer, pp 75 – 128. ISBN: 978-1-84800-379-8.

Raj Aggarwal, T. (1995): General Theory and its application in the High-Speed Milling of aluminium, in *Handbook of High-speed Machining Technology*, R.I. King (197-240). *Chapman & Hall, New York*.

Raj, K.H., Sharma, R.S., Srivastava, S., Patvardhan, C. (2000): “Modeling of manufacturing processes with ANNs for intelligent manufacturing”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 40, 851–868.

Repetto, E. (2002): "Reliability of high speed cutting tools". *Manufacturing Engineer* 81 (4) 165-167.

Rodríguez, C.A., Harnau, T., Wang, Y., Akgerman, N., Altan, T. (1999): "Estimating of machining time in high speed milling of prismatic parts". *Technical papers, No MS99-142. Society of Manufacturing Engineers.*

Schmitz, T., Davis, M., Dutterer, B., Ziegert, J. (2001): "The application of high-speed CNC machining to prototype production", *International Journal of Machine Tools and Manufacturing* 41 (8) 1209–1228.

Schmitz, T.L., Ziegert, J.C., Canning, J.S., Zapata, R. (2008): "Case study: A comparison of error sources in high-speed milling". *Precision Engineering* 32, 126-133.

Schultz, H. (1989): "Aspects in cutting mechanism in high speed cutting". *Annals of the CIRP* 38 (1) 51-54.

Schultz, H., Moriwaki, T. (1992): "High-Speed Machining". *Annals of the CIRP* 41 (2) 637-643.

Siller, H., Rodríguez, C.A., Ahuett, H. (2006): "Cycle time prediction in high-speed milling operations for sculptured surface finishing". *Journal of Materials Processing Technology* 174, 355-362.

Smith, C.S., Wright, P.K., Séquin, (2003): The Manufacturing Advisory Service: web-based process and material selection. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 16 (6) 373-381.

So, B.S., Jung, Y.H., Park, J.W., Lee, D.W. (2007): "Five-axis machining time estimation algorithm based on machine characteristics". *Journal of Materials Processing Technology* 187–188, 37–40.

Steudel, H. (1984): "Past, present and future the CAPP systems". *International Journal of Production Research* 22 (2) 253–266.

Tabucanon, M.T., Batanov, D.N., Verma, D.K., (1994): "Intelligent decision support system (DSS) for the selection process of alternative machines for flexible manufacturing systems (FMS)". *Computers in Industry*, 25, 131-143.

Takeuchi, T., Sakamoto, M., Sata, T. (1982): Improvement in the working accuracy of an NC lathe by compensating for thermal expansion, *Precision Engineering*, 4 (1) 19–24.

- Tan, C.L. (2002): "The impact of Computer-Aided Design (CAD) Systems on Firm Performance. *PhD. Thesis. The University of Toledo, Toledo, USA.*
- Tandon, V., El-Mounayri, H., Kishawy, H. (2002): "NC end milling optimization using evolutionary computation". *International Journal of Machine Tools & Manufacture 42 (5) 595–605.*
- Tansel İç, Y., Yurdakul, M. (2009): "Development of a decision support system for machining center selection". *Expert Systems with Applications 36, 3505-3513.*
- Terrier, M., Dugas, A., Hascoët, J.Y. (2004): "Qualification of parallel kinematics machines in high-speed milling on free form surfaces". *International Journal of Machine Tools & Manufacture 44, 865-877.*
- Trusty, J. (1993): "High-Speed Machining". *Annals of the CIRP 42 (2) 733-738.*
- Trusty, J., Ziegert, J.C., Ridgeway, S. (2000): "A Comparison of Stiffness Characteristics of Serial and Parallel Machine Tools". *Journal of Manufacturing Processes 2 (1) 67-76.*
- Toh, C.K. (2005): "Design, evaluation and optimisation of cutter path strategies when high speed machining hardened mould and die materials". *Materials and Design, 26, 517-533.*
- Tung, E.D., Tomizuka, M., Urushizaki, Y. (1994): "High-speed end mill boring and rounded corner cutting". *Proceedings of the American Control Conference Baltimore.*
- Ulusoy, G., Uzsoy, R. (1992): "Computer-aided process planning and material requirements planning: first steps towards computer-integrated manufacturing". *Interfaces 22 (2) 76–86.*
- Vasilash, G. S. (1997). Machine tool selection made simple. *Automotive Manufacturing & Production, 109(3), 66–67.*
- Vidal, A., Albertí, M., Ciurana, J., Casadesús, M. (2005): "A decision support system for optimising the selection of parameters when planning milling operations". *International Journal of Machine Tools & Manufacture 45, 201–210.*

- Vivancos, J., Luis, C.J., Costa, L., Ortíz, J.A., (2004): Optimal machining parameters selection in high speed milling of hardened steels for injection moulds. *Journal of Materials Processing Technology*, 155-156, 1505-1512.
- Watson, J. (1999): "The control of high-speed machines". *Computing & Control Engineering Journal* 10 (6) 245-255.
- Yan, X., Shiraseb, K., Hiraoc, M., Yasuic, T. (1999): "NC program evaluator for higher machining productivity". *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 39, 1563–1573.
- Yih-fong, T., Ming-der, J. (2005): "Dimensional quality optimisation of high-speed CNC milling process with dynamic quality characteristic". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 21, 506–517.
- Yih-fong, T. (2007): "A hybrid approach to optimise multiple performance characteristics of high-speed computerised numerical control milling tool steels". *Materials and Design* 28, 36–46.
- Yong, T., Narayanaswami, R. (2003): "A parametric interpolator with confined chord errors, acceleration and deceleration for NC machining". *Computer-Aided Design* 35, 1249–1259.
- Yurdakul, M., (2004): "AHP as a strategic decision-making tool to justify machine tool selection". *Journal of Materials Processing Technology*, 146, 365-376.
- Yurdakul, M., Tansel İç, Y. (2009): "Analysis of the benefit generated by using fuzzy numbers in a TOPSIS model developed for machine tool selection problems". *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 310–317.
- Zelinski, P. (2000): "EDM vs. Milling in die/mold Machining". *Modern Machine Shop*, <http://www.mmsonline.com/articles/0700rt1.html>, (último acceso: 28/8/09).