

Máquinas multitarea: evolución, recursos, procesos y programación

Multitasking machines: evolution, resources, processes and scheduling

■■■
Amaia Calleja-Ochoa, Haizea González-Barrio,
Roberto Polvorosa-Teijeiro, Naiara Ortega-
Rodríguez, Luis-Norberto López-de-Lacalle-
Marcaide
Universidad del País Vasco (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8237>

1. EVOLUCIÓN

El sector de la máquina herramienta ha evolucionado para adecuarse a las necesidades industriales de cada época. Tradicionalmente, destacan dos configuraciones dentro de las diferentes tipologías de máquina herramienta: por un lado, el torno, caracterizado por el movimiento rotativo de la pieza a mecanizar y el movimiento de avance de la herramienta, y, por otro lado, la fresadora, caracterizada por el movimiento rotativo de la herramienta y el movimiento de avance de la pieza o de la herramienta según su configuración.

El desarrollo de las primeras fresadoras se atribuye a James Nasmyth (1830), cuya máquina, dotada con un plato divisor, permitía el mecanizado de tornillos hexagonales. Años más tarde, hacia 1979, Henry Maudslay y David Wilkinson desarrollan el primer diseño de un torno para cilindrado de piezas metálicas que permite avanzar a la herramienta de corte a velocidad constante. Inicialmente, el control de ambas configuraciones de máquinas era manual y hacia 1950 nace el término y la tecnología del control numérico. Durante muchos años, se mantiene la clasificación torno/fresadora, hasta que a finales de los años 90 comienzan a aparecer en el mercado las primeras máquinas que incorporan funciones de fresado y torneado en la misma máquina [1]. A continuación se describen cronológicamente algunos avances que han marcado el desarrollo de la máquina herramienta tradicional, clasificada tradicionalmente bajo las configuraciones de torno o fresadora, a la conocida en la actualidad como máquina multitarea:

- 1982: WFL® presenta la máquina

- 2016: MAZAK® presenta su máquina híbrida VARIAXIS j-600 AM.
- 2016: Ibarmia® expone su máquina híbrida ZVH ADD+PROCESS.

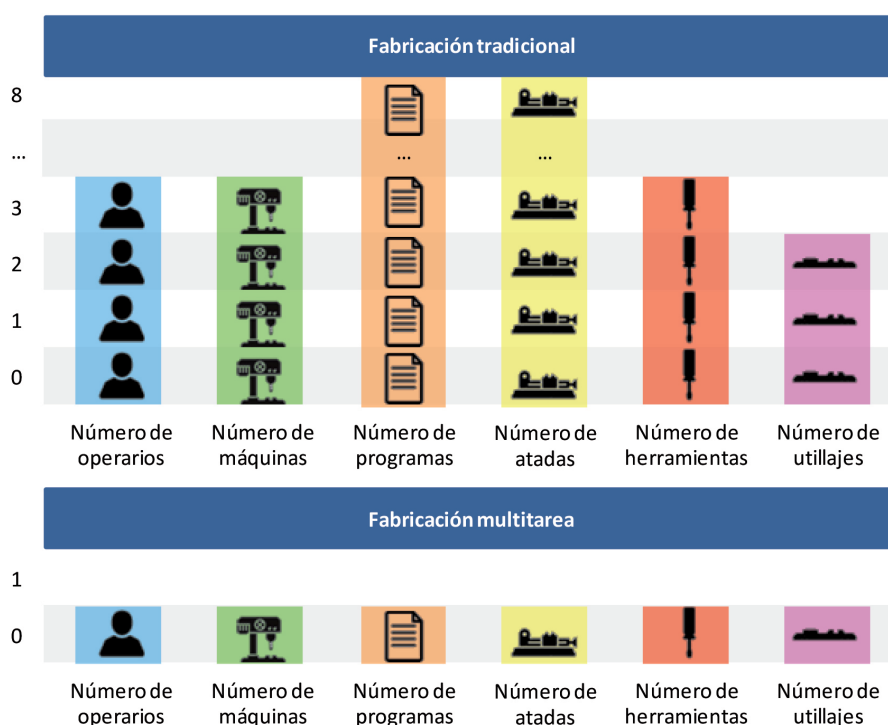


Fig. 1: Comparativa de recursos entre fabricación tradicional y multitarea [2]

WNC 500S MILLTURN.

- 2000: Nakamura Tome® lanza el Super Multi-Tasking Machine STW-40.
- 2001: Mazak® desarrolla la familia de máquinas multitasking INTEGREX e series.
- 2005: DMG/MORI® inicia el desarrollo de la serie NT.
- 2007: GMTK® diseña GEMINIS VL.
- 2007: Ibarmia® presenta su gama ZVH Multiprocess.
- 2008: Nuevos conceptos herramientas para máquinas multitarea (Sandvik®). Multitorretas, cabezales de fresado con mayor potencia y revoluciones incorporadas en centros de torneado (CMZ®, Gurutzpe®, etc.).
- 2011: Soraluce® desarrolla su centro de fresado-torneado Soraluce F-MT.
- 2014: DMG/MORI® presenta mundialmente su máquina híbrida LASERTEC 65D para fabricación aditiva y mecanizado.

2. RECURSOS EN MÁQUINAS MULTITAREA

La reducción de recursos humanos y materiales que presentan las máquinas multitarea frente a los procesos convencionales es una de las principales ventajas de esta tecnología. En concreto, el hecho de agrupar varios procesos de fabricación, que previamente se realizaban en máquinas independientes, permite reducir el número de operarios y el número de máquinas a una sola unidad (Fig.1). En consecuencia, el número de programas se reduce también a uno solo. Lo mismo ocurre con el número de atadas y utillaje necesarios. Esto supone una reducción principalmente en el coste de fabricación del producto. Por otro lado, las máquinas multitarea no implican solamente una reducción de los recursos tradicionalmente utilizados, sino que se genera alrededor de esta tecnología otra serie de necesidades que requieren nuevos desarrollos y puestos de trabajo que deben adaptarse a los

nuevos requerimientos, como puede ser desarrollo de software para máquinas multitarea, programación de varios procesos simultáneamente, etc.

3. CONFIGURACIONES DE MÁQUINAS

La configuración de las máquinas multitarea es muy variada (Fig.2). En términos generales es posible realizar una agrupación (Fig.3) atendiendo a la naturaleza de la máquina (centros de torneado, centros de fresado, máquinas híbridas). A su vez, cada una de las máquinas puede presentar diferente configuración [2] dependiendo de la disposición del husillo (horizontal o vertical) y de los procesos que se integren en la misma (fresado, rectificado, torneado, etc.). Por otro lado, se pueden clasificar

de acuerdo al número de torretas, ejes y husillos. Además, es posible realizar una clasificación por tamaños o sectores de aplicación.

4. INTEGRACIÓN DE PROCESOS

Las máquinas multitarea agrupan multitud de procesos. Inicialmente, se combinaron en varias máquinas procesos multitarea de torneado y fresado. Gracias a los últimos avances, en la actualidad es posible integrar entre sí procesos impensables hasta el momento. Por otro lado, se ha ampliado el rango de materiales susceptibles de ser mecanizados obteniendo resultados altamente eficientes. A continuación se detallan algunos de los procesos más novedosos integrados en esta tipología de máquinas.

4.1. SAM 'SUPER ABRASIVE MACHINING'

La fabricación de componentes de geometría compleja y de materiales de baja maquinabilidad supone un reto a nivel de investigación en la búsqueda de nuevas alternativas, lo que da lugar a la aparición de nuevas tecnologías de fabricación.

Una de las tecnologías innovadoras que ha surgido para afrontar este problema es conocida como *Super Abrasive Machining* (SAM). Este proceso consiste en realizar operaciones de rectificado bajo condiciones de mecanizado; por lo tanto, es capaz de obtener las ventajas de dos procesos convencionales de fabricación como son el rectificado y el mecanizado por arranque de viruta [3]. Actualmente, una de las principales aplicaciones de esta técnica es la fabricación de *fir trees*, que son las juntas de montaje de cada uno de los álabes individuales que componen las partes rotativas de los motores aeronáuticos. No obstante, se está extrapolando dicho proceso a otras geometrías de gran complejidad como es el caso de los *impellers* o los *single-blades*.

El SAM ofrece un mejor comportamiento a la hora de enfrentarse a materiales de baja maquinabilidad, como son el titanio o las aleaciones base Níquel, muy presentes en los componentes rotativos de los motores aeronáuticos. A su vez, ofrece mayores ratios de arranque de material a altas velocidades, obteniendo una geometría muy próxima a la final requerida. Dentro de este proceso cabe destacar una técnica conocida como "Flank SAM", que consiste en utilizar todo el flanco de la herramienta para tratar de alcanzar la geometría final de la pieza de una única pasada. Para ello, se realizan los diseños de las muelas acorde con dicha geometría [4].

El desgaste sufrido por este tipo de herramientas es un desgaste uniforme ya

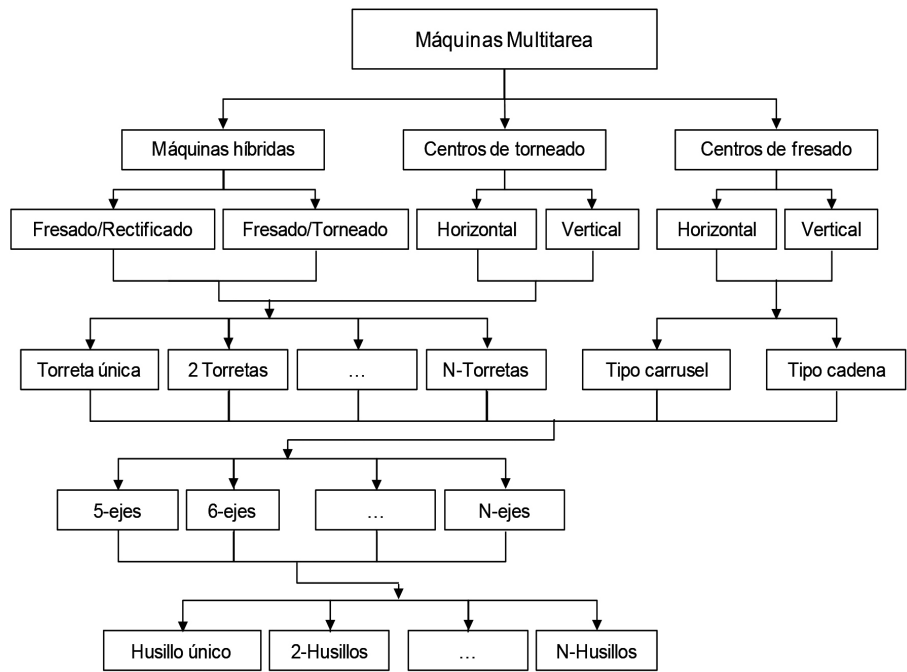


Fig. 2: Clasificación de las máquinas multitarea según su configuración [2]

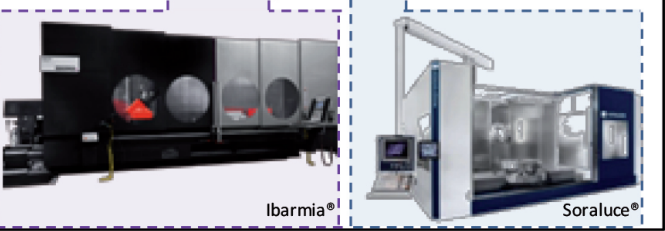
Torno-Fresado	Fresado-Torneado
<u>Configuración: horizontal</u> Nº Husillos:1-2 Nº Torretas:1-2 Nº Ejes:5,6,...,N Fabricantes: Gurutzpe, WFL, GMTK... 	<u>Configuración: horizontal - vertical</u> Nº Husillos:1-2 Nº Torretas:1-2 Nº Ejes:5,6,...,N Fabricantes: Ibarmia, Soraluce... 

Fig.3: Comparación torno-fresado / fresado-torneado



Fig.4: Mecanizado de engranaje con herramienta genérica realizado por el Grupo de Mecanizado de Alto Rendimiento de la UPV/EHU

que realizan un trabajo de 'ranurado' y todas las zonas de la herramienta están sometidas al mismo desgaste. Por otro lado, a pesar del coste de fabricación de estas herramientas de forma, la vida útil de las mismas es suficiente como para que no sea necesario regenerarlas sino que se reemplazan por una nueva herramienta [5].

4.2. MANDRINADO PROFUNDO

El mandrinado profundo es una operación habitual de mecanizado en componentes aeronáuticos; un ejemplo de ello son los trenes de aterrizaje. Hasta la fecha este tipo de operaciones de mecanizado se realizaban en máquinas específicas para ello, siendo difícil su ejecución en máquinas de propósito general. Sin embargo, ciertos fabricantes de máquinas multitarea, como es el caso de Mazak [6], han incluido esta funcionalidad en sus máquinas anclando de forma hidráulica un mandrino en el eje Y con una arquitectura lo suficientemente rígida como para garantizar la correcta ejecución de la operación de mandrinado profundo. En concreto, la máquina de Mazak permite almacenar hasta tres mandrinos de 1000mm de profundidad en un almacén específico para ello.

4.3. FRESADO PROFUNDO CON HERRAMIENTA ESPECIAL DE GRAN RIGIDEZ

Las operaciones de fresado en alojamientos de gran profundidad forman parte del grupo de procesos integrados en máquinas multitarea. Este tipo de operaciones se ejecutan con una herramienta de gran rigidez que a su vez esta rigidamente anclada al husillo de la máquina. Es necesario tener en cuenta las

dimensiones de este tipo de herramientas para su correcto almacenaje en el almacén de herramientas.

Tanto en las operaciones de mandrinado como de fresado profundo, la lubricación representa uno de los factores clave para la calidad de la pieza mecanizada. En estos casos se recurre a la lubricación de alta presión con el objetivo de poder eliminar el calor generado en la zona de corte al mismo tiempo que facilitar la evacuación de la viruta a dicha gran profundidad de mecanizado.

4.4. MANDRINADO CÓNICO CON EJE U

Las operaciones de mandrinado cónico típicas de componentes tipo válvulas requieren una excelente calidad superficial para asegurar el correcto sellado del componente. Por este motivo, este tipo de operaciones de mandrinado cónico se realizan con una herramienta especial (cabezal d'andrea) [7] de eje U controlado en la dirección radial del husillo. De esta forma se puede controlar la punta de la herramienta en la dirección radial mientras el husillo gira. Es posible el mecanizado de superficies interiores cónicas y complejas con este tipo de herramientas de eje U.

4.5. MECANIZADO DE ENGRANAJES CON FRESA MADRE (HOBBING) Y MECANIZADO DE ENGRANAJES CON HERRAMIENTA DE USO GENÉRICO

La integración de operaciones de *hobbing* y mecanizado de engranajes con herramienta de uso genérico en máquinas multitarea son unos de los procesos más frecuentes entre los fabricantes de

este tipo de máquinas. Los engranajes son componentes habituales en varios sectores como aeronáutico (motores), energía, maquinaria de construcción, etc. Tradicionalmente, los engranajes se fabrican en máquinas dedicadas a tal propósito como son las máquinas talladoras de engranajes. En las máquinas multitarea se ha logrado integrar esta misma tecnología gracias a la sincronización del movimiento de rotación del husillo horizontal y del husillo de fresado. De una misma atada es posible fabricar geometrías con diferentes ángulos de hélice y valor de módulos.

Por otro lado, también es frecuente el mecanizado de engranajes con herramienta de propósito general (Fig.4) como pueden ser las herramientas cónicas de punta esférica.

4.6. RECTIFICADO DE ÁLABES DE TURBINA

Dada la gran cantidad de álabes que forman parte de una turbina, son necesarios procesos de fabricación que garanticen alta productividad y automatización para la fabricación de los mismos [8]. Hasta el momento, la fabricación de los álabes en máquinas multitarea está representada por las operaciones de fresado en 5 ejes continuos. Recientemente, la tendencia pasa por incorporar también en la misma máquina el proceso de rectificado. La integración de ambos procesos en la misma máquina permite realizar cambios en la geometría y tamaño de los álabes con mayor flexibilidad.

4.7. ELECTROEROSIÓN (EDM) DE DISCOS DE TURBINA

Las operaciones para el alojamiento de los denominados *fir trees* se realizan mediante brochado, sin embargo, las brochadoras son máquinas de gran tamaño y su coste es elevado al igual que lo es el coste de las brochas. Actualmente, se investiga para introducir los procesos de electroerosión, fresado convencional y SAM en la fabricación de los citados *fir trees*. La tecnología de electroerosión puede integrarse en máquinas multitarea y sumarse a la lista de los procesos integrados en este tipo de máquinas. Mazak ha desarrollado en colaboración con la 'Tokyo University of Agriculture and Technology' un prototipo de máquina multitarea (Mazak) donde se han integrado procesos de fresado y electroerosión [9]. Para este propósito, se instala tanto la cuba como la tecnología de electroerosión. También es posible ejecutar procesos de torneado y taladrado en la misma atada. En la actualidad, una de las líneas más

importantes de investigación en el sector de la máquina herramienta es sin duda la integración de todos los procesos de fabricación requeridos por una misma pieza en una sola máquina.

4.8. TORNEADO CON INSERTOS CILÍNDRICOS

Las operaciones de torneado con insertos cilíndricos en máquinas multitarea utilizan el eje B para modificar el ángulo de ataque durante cada pasada. De esta forma, se evacua mejor el calor generado durante el mecanizado aumentando la vida de la herramienta. El desgaste sufrido por la herramienta es uniforme. Asimismo, el calor no se concentra en una sola zona de la plaquita sino que se distribuye [10].

4.9. TORNO-FRESADO

Las operaciones de torno-fresado (Fig.5) son unas de las más frecuentes en las máquinas multitarea [11, 12, 13]. Para realizar esta operación es necesario dotar de una rotación simultánea tanto a la pieza como a la herramienta y sincronizar ambos movimientos entre sí [14, 15, 16].

4.10. ULTRASONIDOS

La integración de la tecnología de los ultrasonidos permite aumentar la eficiencia de la producción de piezas de geometrías complejas que deben ser mecanizadas en materiales como cerámica, cristal carburo de tungsteno o incluso composites [18]. La superposición del movimiento de rotación de la herramienta con una oscilación adicional facilita el proceso de mecanizado de este tipo de materiales ya que las elevadas fuerzas de corte se pueden llegar a reducir hasta un 40%. Gracias a esta reducción es posible mecanizar estructuras delgadas y aumentar la vida de la herramienta. En este campo destaca la línea de máquinas ULTRASONIC de DMG/MORI [19].

4.11. AM ADDITIVE MANUFACTURING

Una variante de las soluciones basadas en máquinas híbridas multitarea son las que integran la fabricación aditiva y el mecanizado en 5 ejes [20]. Ha sido tal el crecimiento experimentado en esta tecnología que existen diferentes tecnologías atendiendo a la naturaleza del proceso como pueden ser cama de polvo o deposición directa de material [21].

Recientemente ha salido al mercado LASERTEC 4300 3D de DMG/MORI, una máquina híbrida cuya cinemática está basada en la estructura de un cetro de torneado. Otra de las novedades dentro de

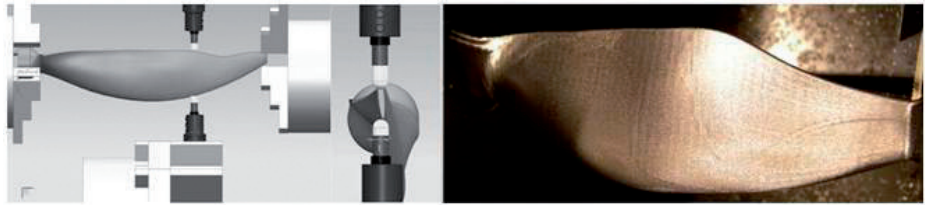


Fig.5: Simulación de una operación de torno-fresado y pieza torno-fresada [17] realizada por el Grupo de Mecanizado de Alto Rendimiento de la UPV/EHU

las máquinas híbridas es la MillGrind EB de Elb-Schliff [22], especialmente diseñada para el mecanizado de componentes de turbina ya que presenta una solución completa de una sola atada combinando los procesos de rectificado y aporte de material.

5. MULTITASKING EN RECTIFICADO

El rectificado se ha llevado a cabo tradicionalmente en máquinas de precisión especial y en ambientes controlados. Hoy en día, sin embargo, y en respuesta a la disminución en tamaños de lotes y variabilidad de geometría, así como a la rápida respuesta demandada por los clientes, los fabricantes de rectificadoras están buscando la máxima flexibilidad para adaptarse a la producción de familias de piezas con geometrías variables. Del mismo modo, se pretende el máximo aprovechamiento de la máquina aun cuando no se requiera el proceso de rectificado en determinado tipo de piezas. Los fabricantes más importantes a nivel mundial han comenzado a ofrecer máquinas de rectificado capaces de realizar otros procesos como el fresado,

torneado en duro o taladrado, entre otros, sobre piezas con durezas de hasta 65HRC.

El primer objetivo de este cambio de concepto en máquina es la reducción de costes y personal. Después, se ha buscado el mantenimiento de la precisión gracias al mecanizado integral de pieza en una sola atada y máquina con la consiguiente eliminación de errores de posicionamiento. Cada atada puede generar un error TIR (*Total Indicator Reading*) o FIM (*Full Indicator Movement*) de 10µm, mientras que disminuye hasta las 2 µm cuando se emplea amarre único.

A la hora de diseñar una máquina *multitasking* con cabezal para rectificado la limitación la posee el proceso de rectificado, por ser el más estricto con la máquina. Así, se parte de un diseño de rectificadora al que se le van incorporando elementos para otras cinemáticas y funciones.

Los casos de éxito en máquinas multitasking que incorporan rectificado son aquellos que combinan torneado en duro y rectificado. La principal ventaja del torneado en duro con respecto al rectificado es una elevada tasa de arranque (disminución de tiempo productivo). La desventaja es, sin embargo, la aparición de una hélice

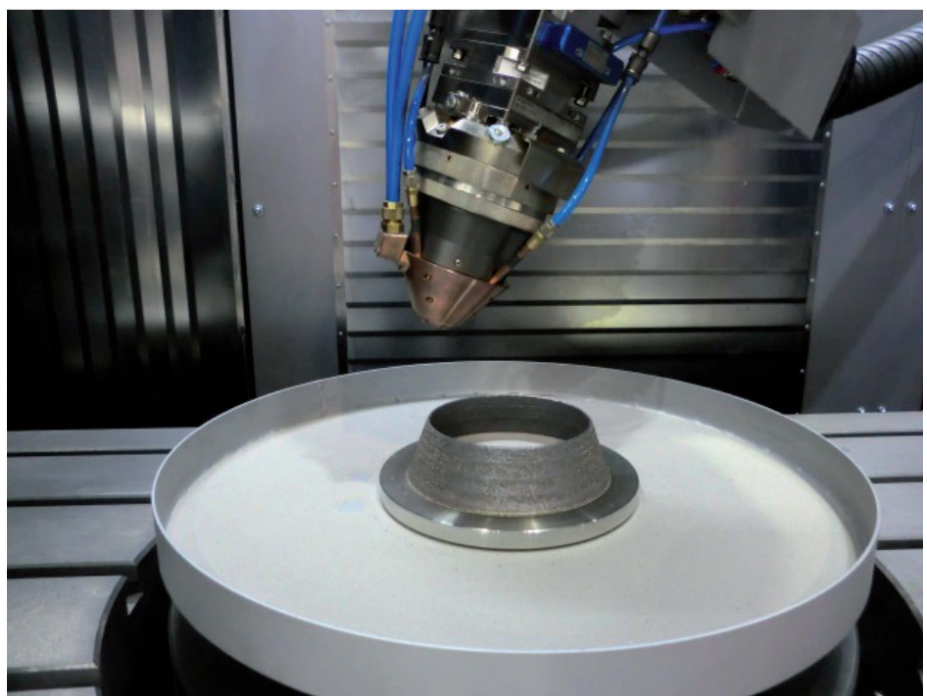


Fig.6 Operación de fabricación aditiva realizada en la ZVH ADD+PROCESS derivada de la colaboración entre Tecnalia, Ibarria y el Grupo de Mecanizado de Alto Rendimiento de la UPV/EHU

en la pieza que limita la precisión a IT6, por lo que debe ser eliminada para asegurar un acabado mínimo. El rectificado posterior asegura el acabado y la concentricidad de las piezas torneadas en duro.

Ejemplos de máquinas de este tipo los encontramos en el fabricante Studer (S-242), con un cabezal para muela, una torreta para 10 herramientas, así como otro cabezal para muelas de interiores. La máquina incluye dos cabezales pieza y está destinada a series largas de piezas para automoción y bienes de equipo. Actualmente, esta serie de máquinas ofrece como opción, además, el sistema Wire-Dress® para diamantado por electroerosión de muelas con aglomerante metálico multicapa y grano no recubierto.

Otros ejemplos son el torno vertical de Bohle Machine Tools (borderus grinding centres- CNC 235 Vertical Grinding Center) con doble cabezal para herramienta de torneado y muela, dirigida principalmente a rectificado de interiores. Otro fabricante con máquina similar (torneado vertical y rectificado) la ofrece EMAG en su VTC 315 DS.

Por último, entre los fabricantes nacionales, cabe mencionar la serie de rectificadoras verticales VG de Danobat con un diseño innovador dirigido a reducir al mínimo los tiempos entre cambios de componentes, herramientas o utillajes para el rectificado de precisión de componentes de tamaño grande y medio.

Existen otro tipo de máquinas multitasking que incorporan más operaciones a la ya mencionada de torneado en duro. Mägerle, por ejemplo, ofrece fresado, taladrado y rectificado en su máquina multitasking MFP 50. Se trata de una máquina de 9 ejes con cambio automático de muela que permite diamantado continuo, rectificado tipo *creep feed*, rectificado a alta velocidad con muelas de CBN, todo en la misma máquina. Dispone de sistema de paletización, cambio automático de herramienta y muela, así como boquillas orientables por CNC.

Makino, por su parte, oferta su i-grinder G7 con posibilidad de torneado, fresado y rectificado dirigida a piezas y materiales del sector aeronáutico como componentes de turbinas, piezas con acoplamiento tipo curvic y NGVs. Para ello, la máquina cuenta con 5 ejes controlados y 2 boquillas orientables por CN para las diferentes posiciones de la herramienta correspondiente durante el mecanizado.

Dentro de las máquinas multitasking de tecnología híbrida, tenemos, por último, la propuesta de DMG/MORI, que es capaz de torneado en duro y rectificar. Su

novedad radica en la posibilidad de llevar a cabo la tecnología "grind hardening" (templado por rectificado) ofertada como solución integral con la venta de la máquina. Dispone de boquillas orientables vía CN y de un sensor para control de diámetros denominado hydrogage que establece la medida del diámetro actual de pieza en función de la presión hidráulica.

6. SOFTWARE Y CONTROL

La aparición de nuevas tecnologías de fabricación supone un gran desafío para el desarrollo de software. Son numerosas las compañías que tratan de dar solución a la necesidad de integrar dichas tecnologías en sus plataformas de CAD/CAM/CAE. La fabricación aditiva constituye uno de estos grandes retos debido a la necesidad de reproducir el proceso desde que se forma la primera capa de material hasta la geometría final de la pieza aportada.

La compañía alemana AIX-Path(GmbH) [23] ha desarrollado un módulo (iBeRep) para dar solución a la virtualización de la reparación de álabes de turbina de gas. Dicho módulo permite generar estrategias CAM para el aporte láser de geometrías complejas, mostrando las trayectorias a seguir y una estimación de la geometría final de pieza.

Por otro lado, Siemens, uno de los líderes entorno a los software CAD/CAM/CAE, ha desarrollado un entorno virtual dentro de su software NX para dar soporte a la fabricación aditiva. Este módulo ofrece la posibilidad de reproducir el proceso completo de fabricación híbrida, generando así el cordón de material aportado y la geometría final de aporte, como, a posteriori, utilizando el módulo CAM de arranque de viruta para obtener las dimensiones finales de la pieza. Ofrece, a su vez, la posibilidad de realizar una verificación virtual completa del proceso híbrido teniendo en cuenta todos los componentes presentes en el proceso y la cinemática real de la máquina. Este software está desarrollado con DMG/MORI para su máquina híbrida Lasertec 65D.

7. RETOS

7.1. RETOS MULTITASKING

De la mano de los desarrollos de nuevos procesos en las máquinas multitarea va el desarrollo de software encaminado a la mejora del funcionamiento de las máquinas. Este es el caso de la integración en el control de la máquina de funciones como son la compensación térmica para

evitar errores debidos a variaciones en la temperatura y la compensación volumétrica de las máquinas orientada a la corrección de posibles errores a lo largo de los diferentes movimientos de la máquina.

7.1.1. Compensación térmica

La compensación térmica es una función instalada en la gran mayoría de las máquinas multitarea cuyo objetivo es compensar las posiciones en los ejes que sean necesarios debido a distorsiones relacionadas con la variación de temperatura. Esto se realiza gracias al control de la sensorica instalada en las máquinas.

7.1.2. Compensación volumétrica

La compensación volumétrica tiene como objetivo corregir errores en punta de la herramienta debido errores detectados en el movimiento a lo largo del recorrido de los ejes. Estas variaciones son debidas a las deformaciones propias de las piezas estructurales, errores en montaje, etc. Para llevar a cabo el proceso de compensación volumétrica se utiliza la tecnología laser tracer [24].

7.1.3. Compensación de desgaste de punta de herramienta

La compensación de mecanizado por desgaste de punta de herramienta es especialmente útil en mecanizados largos sin cambio de herramienta. Esta idea permite recalcular las trayectorias de mecanizado teniendo en cuenta la posible variación del radio de la herramienta o distancia máxima al TCP (Tool Center Point) por desgaste de esta. Una técnica posible es la medición de la herramienta a intervalos regulares de tiempo durante el mecanizado con la sonda de reglaje de herramientas ubicada en la máquina, y añadir estos valores a la tabla de compensaciones del control para que sean tenidos en cuenta durante el subsiguiente mecanizado. Otra aproximación posible en máquinas con un eje adicional indexable es hacer uso de él, modificando el ángulo de ataque de la placa, lo que en torneado se denomina torneado con eje vivo.

7.2. RETOS MANUFACTURING

Teniendo en cuenta el rápido desarrollo de las máquinas multitarea con continuas actualizaciones con el fin de integrar procesos novedosos [25, 26, 27] para dotarlas de mayor número de funcionalidades, parece que la tendencia de futuro es la integración de procesos llevado al límite. La pieza se fabrica de principio a fin en la misma máquina en una sola atada.

Otro de los retos de futuro es la fa-

bricación de piezas cada vez más complejas geométricamente, posibilitando el diseño de conjuntos con menor número de componentes y obteniendo piezas de mayores tamaños. Por otro lado, pero no menos importante, es necesario destacar el reto que presenta la fabricación de piezas de nuevos materiales especialmente en el sector aeronáutico. En este tipo de materiales resulta fundamental el control sistemático de la temperatura [28] generada durante el mecanizado, por ejemplo mediante sensorización de pieza y utillaje con termopares [29]. Su objetivo es poder realizar un control adaptativo de condiciones y parámetros de corte para evitar daños o distorsiones en el componente, teniendo además en cuenta los reducidos espesores de pieza en los que se mueve este sector con el fin de reducir la masa de los componentes.

8. CONCLUSIONES

La evolución del sector de la máquina herramienta hacia máquinas que integran varios procesos de fabricación de naturaleza diferente en la misma máquina, presenta una serie de ventajas como son la reducción de: recursos humanos, equipamiento (número de máquinas), número de programas, atadas, herramientas, utillajes, etc. Por otro lado, es tal la diversidad de procesos que pueden ser integrados y de configuraciones de máquinas, que el usuario debe tener claro cuáles son sus necesidades a la hora de adquirir un equipamiento u otro. Además, es necesaria una formación extra en el manejo del equipamiento y al mismo tiempo en el control del software que lo controla y programa.

PARA SABER MÁS

[1] Nagae A, Muraku T, Yamamoto H. "History and Current Situation of Multi-Tasking Machine Tools". SME-Japan. Vol.2012 p.1-5.
[2] Djassemi M. "Emergence of multitasking machining systems: applications and best selection practices". Journal of Manufacturing Technology Management. Vol.20-1 p.130-142.
[3] Guo C, Ranganath S, McIntosh D, Elfizy A. "Virtual high performance grinding with CBN wheels". CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 57-1 p.325-328. (DOI: <http://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.071>)
[4] Klocke F, Soo SL, Karpuschewski B, Webster JA, Novovic D, Elfizy A, Axinte DA, Tönissen S. "Abrasive machining of advanced aerospace alloys and composites". CIRP Annals - Manufacturing Technology. Vol.64-2 p.581-604.

[5] Aspinwall DK, Soo SL, Curtis DT, Mantle AL. "Profiled superabrasive grinding wheels for the machining of a nickel based superalloy". CIRP Annals - Manufacturing Technology. Vol. 56-1 p.335-338. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2007.05.077>)
[6] www.Mazak.com
[7] www.dandrea.com
[8] Ortega N, Campa F, Fernandez A, Alonso U, Olvera D, Compeán F. "Study of the stiffness for predicting the accuracy of machine tools". DYNA. Vol.85-9 p.730-737. (DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/3832>)
[9] Sasahara H, Mizobe K, Hara S, Kushihashi N, Shindo S. "Novel machining method to fabricate a large size turbine disks with mandrel type fixturing jig and EDM on a multi-tasking machine". Proceedings of the 15th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology EUSPEN. Vol. 2015 p.377-378.
[10] <http://www.mitsubishicarbide.com/en/magazine/article/rotatingtool>
[11] Schulz H, Kneisel T. "Turn-milling of hardened steel and alternative to turning". CIRP Annals - Manufacturing Technology. Vol.43-1994 p.93-96.
[12] Choudhury SK, Bajpai JB. "Investigation in orthogonal turn-milling towards better surface finish". Journal of Materials Processing Technology. Vol.170-2005 p.487-493.
[13] Savas V, Ozay C. "The optimization of the surface roughness in the process of tangential turn-milling using genetic algorithm". Int J Adv Manuf Technol. Vol.37-2008 p.335-340
[14] www.mastercam.com
[15] Savas V, Ozay C. "The optimization of the surface roughness in the process of tangential turn-milling using genetic algorithm". International Journal of Advanced Manufacturing Technologies. Vol.37-2008 p.335-340.
[16] Choudhury SK, Bajpai JB, "Investigation in orthogonal turn-milling towards better surface finish". Journal of Materials Processing Technology. Vol.170-2005 p.487-493.
[17] Calleja A, Fernández A, Rodríguez A, Lamikiz A, López de Lacalle LN. "Turn-milling of blades in turning centres and multitasking machines controlling tool tilt angle". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. Vol. 229-8 p.1324-1336.
[18] Goigana M, Sarasua JA, Ramos JM, Echavarri L, Cascón I. "Pulsed ultrasonic assisted electrical discharge machining for finishing operations". International Journal of Machine Tools and Manufacture. Vol.109-2016 p.87-9.
[19] www.dmgmori.com
[20] Lorenz KA, Jones JB, Wimpenny DI, Jackson MR. "A review of hybrid manufacturing". Procedia Manufacturing. Vol.5-2016 p.1018-1030.
[21] Wendt C, Fernández SR, Gómez A, Batista M, Marcos M. "Processing and quality evaluation of additive manufacturing monolayer specimens". Adv. Mater. Sci. Eng. Vol. 2016-1 p.1-8.
[22] www.elb-america.com
[23] www.aixpath.de
[24] www.afm.es
[25] López de Lacalle LN, Rodríguez A, Lamikiz A, Celaya A, Alberdi R. "Five-axis Machining and Burnishing of Complex Parts for the improvement of surface roughness". Materials and Manufacturing Processes. Vol.26-2011 p.997-1003.
[26] Prevéy P, Ravindranath R, Shepard M, Gabb T. "Case Studies of Fatigue Life Improvement Using Low Plasticity Burnishing in Gas Turbine Engine Applications". Proceedings of ASME Turbo Expo, Atlanta, GA. p.16-19.
[27] Rodríguez A, López de Lacalle LN, Celaya A, Lamikiz A, Albizuri J. "Surface Improvement of Shafts by the Deep Ball-Burnishing Technique" Surface & Coatings Technology. Vol. 206-2012 p.2817-2824.
[28] Golden PJ, Shepard MJ. (2007) Life prediction of fretting fatigue with advanced surface treatments, Materials Science and Engineering, 15-22, 468-470.
[29] Chen P. "Cutting temperature and forces in machining of high performance materials with self-propelled rotary tool". JSME Int.J.Ser III, Vol.35-1992 p.180-185.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer el apoyo empresarial recibido por parte de las compañías Ibarria, Gurutzte, asimismo como el apoyo institucional recibido a través del proyecto ZERO del programa Etorgai de Gobierno Vasco y del proyecto TURBO del Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España.