

# **Análisis de los requisitos dinámicos del fresado de impellers**

**F.J. Campa Gómez<sup>(1)</sup>, O. Altuzarra Maestre, C. Roldán Paraponiaris, A. Calleja Ochoa, A. Fernández Valdivieso**

*(1) Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad del País Vasco UPV/EHU  
fran.campa@ehu.es*

---

*El mecanizado de platos de impellers constituye una de las operaciones de mecanizado de mayor complejidad. Las dificultades provienen en primer lugar de la geometría alabeada de la pieza, que complica la fase de programación en CAM de la trayectoria de la herramienta, hace que sea necesario emplear máquinas con capacidad de interpolar en 5 ejes y herramientas especiales, generalmente cónicas con punta de bola. Asimismo, el propio material de la pieza, titanio, inconel, aluminio, complica o facilita el proceso. Por último, y relacionado con el material de pieza, las fuerzas de corte pueden generar una flexión de la pieza y de la herramienta, así como vibraciones de ambas, que pueden degenerar en una superficie geoméricamente distinta de la que se pretende obtener y con defectos superficiales. Este trabajo pretende hacer un análisis de los factores que afectan a la primera problemática, en concreto, a la ejecución de la trayectoria generada en la fase de CAM por parte de la máquina.*

---

## **1. INTRODUCCIÓN**

El fresado tangencial o flank-milling de platos de álabes o impellers en materiales como Inconel 718, titanio Ti6Al4V, o aluminio es uno de los procesos de arranque de viruta de mayor valor añadido en la actualidad. También es, posiblemente, una de las operaciones más exigentes desde el punto de vista de la máquina herramienta [1]. Por una parte, las elevadas fuerzas de corte que se generan en el proceso requieren de una estructura de una gran rigidez y amortiguamiento para evitar la deformación estática y la aparición de vibraciones forzadas y autoexcitadas. Por otra parte, la geometría altamente compleja de los álabes, con superficies no regladas o regladas por un cono, exige que la máquina sea altamente dinámica, capaz de posicionar la herramienta con gran precisión y rapidez realizando interpolaciones en 5 ejes. El empleo de una máquina de 5 ejes es esencial para poder realizar los giros necesarios para generar la superficie alabeada. La capacidad de la máquina para realizar dicha tarea cumpliendo con los objetivos de posición y velocidad de avance programados depende de la configuración cinemática, su masa y rigidez, de los accionamientos y de un correcto ajuste de los lazos de control.

El presente trabajo se ha centrado en cuantificar los requisitos dinámicos del mecanizado de estas piezas. Para ello, se han estudiado diferentes geometrías de álabe con trayectorias de mecanizado y velocidades de avance distintas. Como resultado, se han obtenido datos de las especificaciones que deben cumplir los accionamientos de una máquina herramienta para mecanizar este tipo de piezas con una alta productividad. Esta información puede utilizarse para el diseño de una máquina específica para esta tarea o para el desarrollo de métodos para una mejor utilización de los accionamientos de una máquina.

## **2. GENERACIÓN DEL MOVIMIENTO EN UN CONTROL CNC**

Previamente al estudio de los requisitos dinámicos de un plato de álabes, se va a explicar el proceso de la generación de la trayectoria y velocidad de avance y su implementación en el control de la máquina herramienta. En la fase de CAM se parte de una geometría ya especificada, que puede ser reglada o no, y se genera la trayectoria que seguirá la punta de la herramienta así como los cosenos directores del eje de la misma. Existen diferentes

algoritmos para ello en función del tipo de movimiento, los más básicos son la interpolación lineal y la circular, aunque se pueden generar los puntos en base a curvas tipo NURBS. Esta última opción permite representar trayectorias complejas con pocos puntos, aunque lo más habitual es discretizar la trayectoria en numerosas interpolaciones lineales muy pequeñas cuyos puntos iniciales y finales se encuentran dentro de un margen de tolerancia con respecto a la curva real, denominado Intol-Outtol. Generada la trayectoria, el programador de CAM selecciona la velocidad de avance de la punta de la herramienta. Dicha información, junto con los ceros y la cinemática de la máquina, es utilizada por el postprocesador para generar el código NC que se implementará en la máquina.

Esta fase es clave para obtener un buen rendimiento de la máquina y una pieza final de calidad. La tolerancia obviamente está relacionada con la calidad de la pieza y determina en parte la longitud de las pequeñas interpolaciones lineales. También influye en ese aspecto la discretización de la trayectoria, es decir, el número de puntos que se eligen para representarla. Sin embargo, una reducción de la tolerancia con una discretización muy fina no necesariamente redundará en una mayor calidad de pieza. Por otra parte, hay que tener en cuenta que la velocidad de lectura del control numérico es limitada, y, por tanto, puede ocurrir que para una velocidad de avance dada, el control numérico no sea capaz de hacer la lectura en tiempo real y la ejecución del programa se ralentice. Un valor habitual es de 0,5 ms por bloque. Es por ello que la velocidad de avance seleccionada también resulta crítica. Aunque la herramienta y el material permitan valores altos, puede ocurrir que el tiempo de lectura del control sea incapaz de absorber el flujo de comandos.

Por último, puede ocurrir que el avance seleccionado no pueda ser ejecutado físicamente por los accionamientos de los ejes de la máquina. Así, partiendo de la base de que se emplea una máquina cartesiana, al programar en tres ejes, es relativamente sencillo relacionar la velocidad de avance de la herramienta con la de los accionamientos y determinar a simple vista si un avance dado es posible o no. Sin embargo, programando en 5 ejes dicha visión inmediata se pierde, sobre todo para los ejes rotativos, y si no se realizan estimaciones previas, es posible que se programen velocidades de avance inasumibles que se traducen en que la ejecución del programa se vuelve lenta o incluso se detiene para dar tiempo a que los ejes rotativos realicen sus movimientos.

Al respecto, las tablas de parámetros de los controles permiten visualizar la velocidad de avance de trabajo máxima, la velocidad máxima de los ejes lineales y rotativos, pero también las aceleraciones y el jerk, que igualmente pueden ser inasumibles si no se tienen en cuenta a la hora de programar la velocidad de avance y la trayectoria. Así pues, están limitadas las aceleraciones máximas de los ejes, la aceleración tangencial y centrípeta máxima en punta de herramienta así como el jerk máximo en los ejes y en dirección tangencial.

Finalmente, sean respetadas o no las limitaciones de los accionamientos, el propio control modifica la trayectoria y modula dicha velocidad para adaptarlas a los cambios de dirección utilizando para ello algoritmos de look-ahead y filtros cuya programación interna depende del fabricante. Respecto a la trayectoria, el control puede decidir una modificación de la misma. Así, salvo que se especifique lo contrario, las aristas vivas son redondeadas para evitar la detención del avance de la máquina durante las mismas, con lo que se gana productividad a costa de perder cierta precisión. Por otro lado, algunos controles disponen de algoritmos de suavización de la trayectoria basados en la aplicación de filtros a la aceleración estimada. Puesto que las fuerzas de inercia que soporta la máquina durante el movimiento son proporcionales a la aceleración, un movimiento que suponga una aceleración con un contenido en frecuencia cercano a los modos de la máquina generará vibraciones indeseadas durante el movimiento que producirán un mal acabado y errores geométricos en la pieza. Para evitarlo, los algoritmos de suavización emplean filtros pasabajo y filtros de banda que amortiguan los armónicos de la aceleración no deseados [2]. La utilización del filtro no es trivial, ya que un filtrado excesivo puede traducirse en un error en la trayectoria no tolerable.

Respecto al avance, los algoritmos de look-ahead se encargan de regularlo durante la ejecución. Cuando se realizan interpolaciones lineales largas, la velocidad de avance varía según el perfil de movimiento seleccionado en el control: perfil trapecoidal de aceleración,

perfil seno cuadrado, senoidal, etc. Cuando se realizan interpolaciones cortas, el perfil de movimiento arranca y detiene la máquina al principio y final de cada interpolación, lo cual resulta en un movimiento muy lento e interrumpido, en el que nunca da tiempo a que la velocidad de avance se acerque a la programada. Para evitarlo, la función look-ahead realiza una lectura de los  $N$  bloques siguientes al actual para que el control disponga de un buffer de comandos con el que anticiparse a los movimientos sucesivos de la siguiente manera.

En primer lugar, si en dichos bloques no está prevista una parada o un cambio de dirección brusco, el control acelera ininterrumpidamente hasta alcanzar la velocidad programada. Si por el contrario, en el buffer se detecta el final de un movimiento, el look-ahead prevé la parada y comienza a reducir la velocidad de avance hasta llegar al punto final con velocidad cero. Para ello, es importante que el número de bloques que considera el look-ahead sea tal que al terminar su ejecución haya dado tiempo a que se produzca la parada partiendo de la velocidad de avance máxima. Por último, si se observa un cambio brusco de dirección con un ángulo determinado, se ejecuta un algoritmo que reduce la velocidad de avance en función de dicho ángulo, considerando incluso la detención provisional del avance si se trata de una arista viva.

De esta forma se completa la fase de generación de la trayectoria y empieza la de control del movimiento, donde el propio control realizará interpolaciones con la trayectoria generada para introducir una consigna de posición cada vez que se cierre el lazo de control de posición.

### 3. ESTRATEGIAS DE MECANIZADO DE UN PLATO DE IMPELLERS

En la figura 1 se muestran las dos geometrías de los álabes de un plato de impellers, denominadas aquí *splitter* y *blade*, que han sido objeto de estudio. Existen diferentes procesos de fabricación para este tipo de piezas en función de su forma, tamaño y el material de la pieza. Los platos de tamaño grande para aplicaciones aeronáuticas, no obstante, son fresados en centros de mecanizado de 5 ejes.

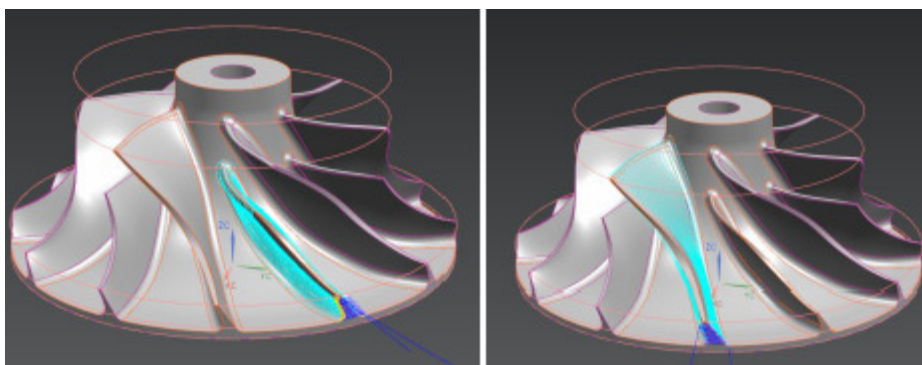


Figura 1. Álabes de un plato de impellers: *splitter* (izquierda) y *blade* (derecha)

La estrategia de mecanizado empleada depende fundamentalmente de la geometría del álabe y del tipo de mecanizado: de semiacabado o de acabado. Así, el fresado en múltiples pasadas se realiza progresivamente a distintas alturas del álabe como se puede ver en la parte derecha de la figura 2, donde se muestra en verde la trayectoria de la punta de la herramienta y en rojo la evolución del eje de la herramienta. Es la estrategia más común, válida para cualquiera de las circunstancias anteriores. Los inconvenientes de esta estrategia son que entre pasada y pasada pueden quedar marcas sobre la superficie que necesitarán de acabado posterior. Además, se requiere de altos avances para que la operación sea rentable, hecho que conlleva unas grandes exigencias dinámicas para los accionamientos de la máquina. Por otro lado, cuando se trata de superficies regladas bien por un cilindro o por un cono, el mecanizado de acabado puede realizarse en una sola pasada cortando una profundidad radial de décimas de milímetro con todo el flanco de la herramienta, como se muestra en la parte izquierda de la figura 2. La principal desventaja de la estrategia de una sola pasada es la posible aparición de chatter regenerativo, debido a

la gran profundidad axial que puede llegar a cortar la herramienta en ciertas posiciones a lo largo de la trayectoria. Desde el punto de vista dinámico, también se trata de una operación exigente para los accionamientos ya que supone realizar interpolaciones en 5 ejes con cierta rapidez y precisión, pero menos que la primera como se verá a continuación.

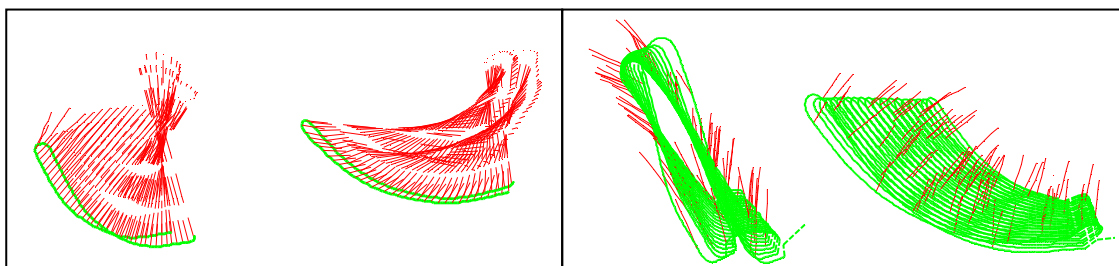


Figura 2. Estrategias de mecanizado de álabes: Pasada única (izquierda) y múltiples pasadas (derecha)

#### 4. REQUISITOS DINÁMICOS DEL MECANIZADO DE UN PLATO DE IMPELLERS

La alta exigencia dinámica de estos mecanizados se debe a la necesidad de interpolar simultáneamente en 5 ejes y al alto avance programado en la punta de la herramienta. Así, un objetivo de velocidad de avance razonablemente alto puede cifrarse en 6000 mm/min. Actualmente, dicha velocidad es asumible desde el punto de vista de las fuerzas de corte, del desgaste y del acabado superficial final de la pieza. Sin embargo, la mayor limitación proviene de los accionamientos cuyos límites de velocidad, aceleración y jerk pueden impedir alcanzar dicho objetivo.

A continuación se muestra el análisis realizado para las dos geometrías de álabe según las dos estrategias de mecanizado, una pasada y múltiples pasadas. En primer lugar se ha partido de los ficheros apt de la trayectoria generados mediante Unigraphics, para lo que se ha discretizado la trayectoria en interpolaciones lineales con una tolerancia Intol-Outtol de 0,01 mm. Estos ficheros contienen las posiciones de la punta de la herramienta así como los cosenos directores del eje de la misma. Se ha tenido en cuenta el avance programado y la distancia entre puntos para garantizar que el tiempo entre bloques no es inferior al tiempo de lectura de los mismos por parte del control, 0,5 ms. Además, se han eliminado puntos de pivotamiento, en los que la herramienta tiene rotación sin velocidad de avance en la punta, y que producen la detención del avance de la máquina al ejecutar los mismos. Posteriormente, se ha realizado un post-procesado de dicha información y se han calculado las posiciones de los ejes giratorios A y C, que corresponden, respectivamente, a los giros de nutación y precesión de la herramienta con respecto a la pieza. Con dicha información, y teniendo en cuenta el avance programado, se pueden obtener por derivación numérica las velocidades, aceleraciones y jerk de los ejes. Esta información puede además analizarse realizando la transformada de Fourier, con lo que se puede medir la sollicitación del proceso en términos de ancho de banda.

##### 4.1. Requisitos de velocidad, aceleración y jerk en el dominio del tiempo

En las figuras 3 y 4 se muestran los resultados para el mecanizado del splitter a una velocidad de avance de 6 m/min con una pasada y múltiples pasadas: posición, velocidad, aceleración y jerk en los ejes, velocidad de avance, aceleraciones tangencial y normal de la punta de herramienta, así como el jerk tangencial. Como referencia, se han indicado en rojo los límites de la máquina, una fresadora de 5 ejes Ibarria ZV25U que cuenta con un control Heidenhain iTNC530, ejes lineales con husillo a bolas, eje rotativo A con transmisión por polea y eje rotativo C con transmisión por tornillo sin fin.

Como se puede observar, para dicha velocidad de avance se sobrepasa la capacidad de los accionamientos de la máquina, especialmente en los movimientos de rotación, que deben ser notablemente ágiles para este tipo de piezas. Además, se observa cómo tanto la estrategia de múltiples pasadas como la de una sola pasada son notablemente exigentes. Las mismas conclusiones pueden extraerse para el álabe tipo blade.

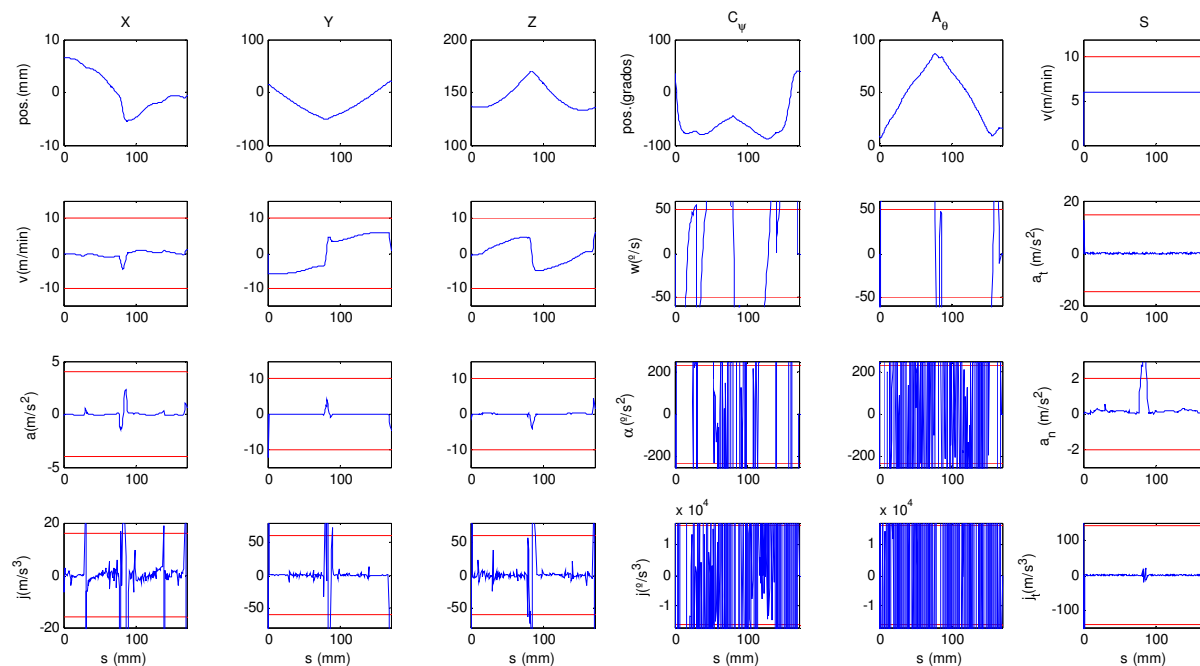


Figura 3. Requisitos dinámicos del fresado del splitter con una pasada

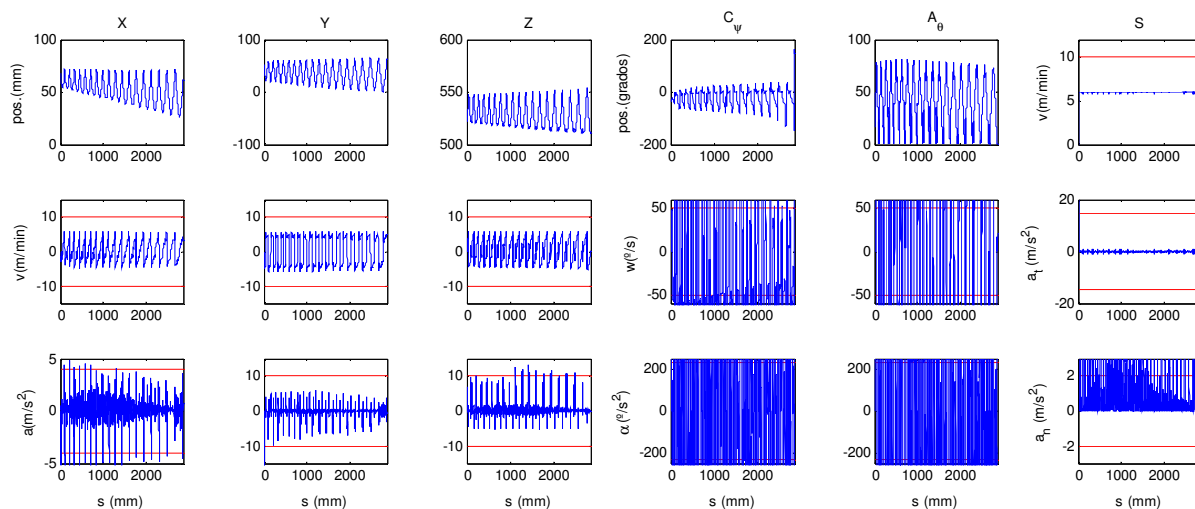


Figura 4. Requisitos dinámicos del fresado del splitter con múltiples pasadas

Posteriormente, con el objetivo de estudiar cómo varían los máximos de velocidad, aceleración y jerk en función del avance programado para cada geometría, se han programado distintos valores de la velocidad de avance: 6000, 3000, 900, 600, 300 y 100 mm/min. En la figura 5 se muestran los resultados con la referencia de las características de la máquina mencionada anteriormente. Se puede concluir que el mecanizado del álabe tipo blade en estrategia de una pasada es el más exigente para los ejes lineales, mientras que la estrategia de múltiples pasadas para los dos álaves resulta la más exigente para los ejes rotativos.

#### 4.2. Requisitos de velocidad, aceleración y jerk en el dominio de la frecuencia

En la figura 6 se muestra la transformada de Fourier de las señales de posición y aceleración de los ejes para el mecanizado del álabe tipo splitter con las dos estrategias de mecanizado a dos velocidades de avance: 6000 mm/min y 900 mm/min. El estudio del

contenido en frecuencia de la señal de posición es interesante desde el punto de vista del ancho de banda que será necesario en el accionamiento. Para las piezas estudiadas, y con el avance máximo estudiado de 6000 mm/min, en ningún caso supera los 10 Hz, cifra alcanzable por el ancho de banda de un accionamiento adecuadamente diseñado.

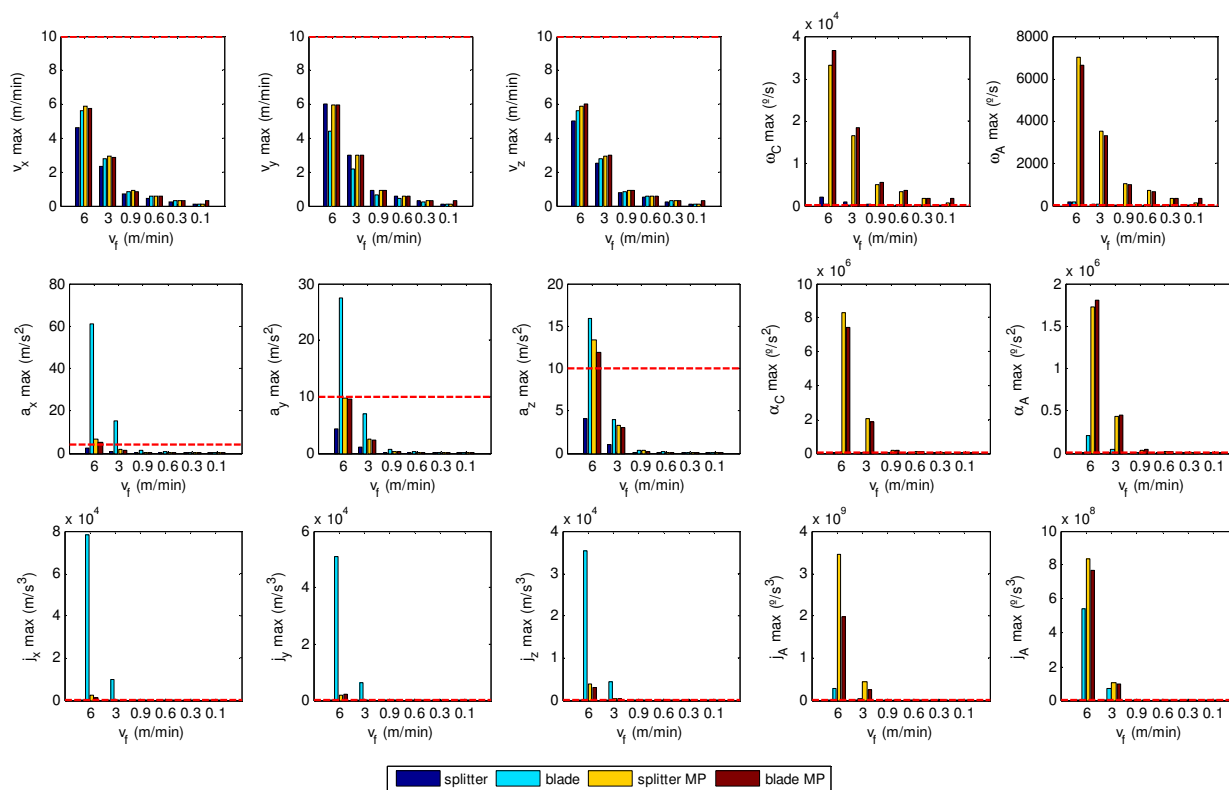


Figura 5. Requisitos dinámicos del fresado de los distintos álabes para varias velocidades de avance

Por otra parte, el estudio de la aceleración determina a qué frecuencias excitarán a la máquina las fuerzas de inercia. Al respecto, se puede observar en la figura 6 cómo en el caso de la estrategia de múltiples pasadas a 6000 mm/min aparecen un gran número de armónicos de gran relevancia en el rango de 20 a 100 Hz. Este hecho implica que las frecuencias naturales de la máquina dentro de ese margen podrán verse excitadas durante el mecanizado, con lo que generarán problemas de vibración sobre la superficie de la pieza. Si se desea diseñar una máquina para mecanizado de platos de álabes, la rigidez y especialmente la frecuencia de los primeros modos de la estructura deberán tener en cuenta este hecho.

## 5. OPTIMIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO

Cuando se programa una operación como las anteriores en las que la máquina no tiene las prestaciones necesarias, el resultado es que el avance de la herramienta es inferior al programado, llegando a detenerse sobre todo en las zonas de menor radio de curvatura, y por tanto el mecanizado de la pieza se hace inviable desde el punto de vista de la productividad. Aunque aún no se ha realizado un estudio experimental riguroso al respecto, las primeras pruebas realizadas en la máquina Ibarria ZV25U así lo confirman.

Sin embargo, cabe decir que los algoritmos de look-ahead contribuyen a reducir la magnitud de este problema ya que al reducir el avance en función de la curvatura, las aceleraciones y jerk necesarios son menores. Se podría decir en ese sentido que un cálculo más certero de las prestaciones dinámicas realmente necesarias debería tener en cuenta dicho algoritmo. No obstante, los look-ahead son distintos para cada fabricante de controles y además éstos no suelen ofrecer información detallada de los mismos, por lo que simular dicho efecto de forma cuantitativa resulta complejo.

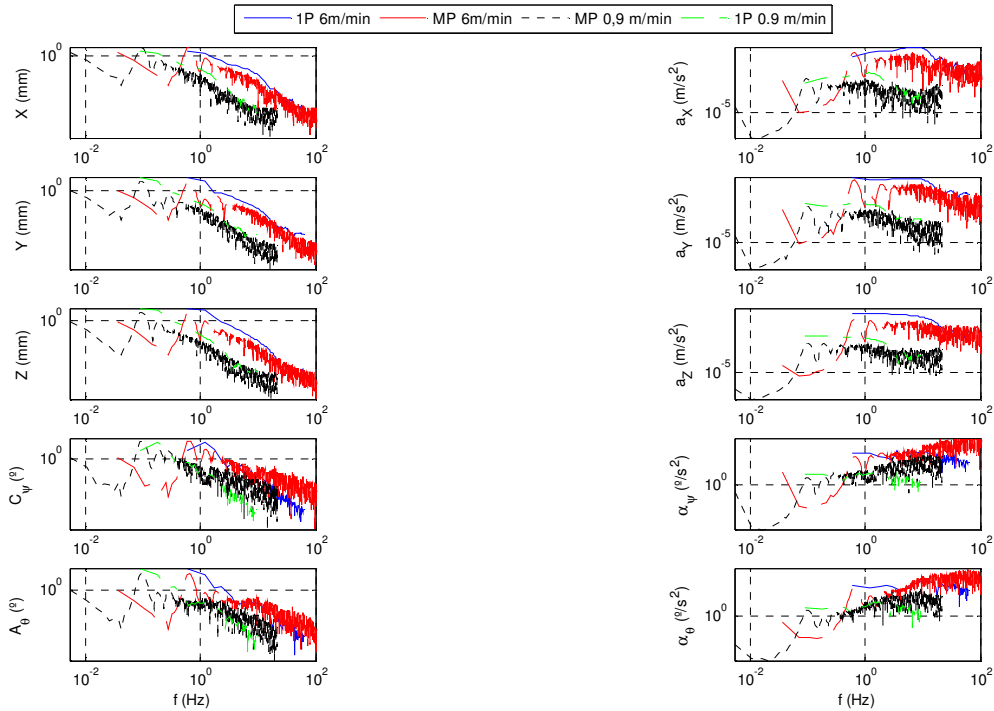


Figura 6. Análisis de Fourier de las señales de posición (izquierda) y aceleración (derecha) de los ejes para el álabe splitter con una estrategia de una pasada (1P) y varias pasadas (MP) a 6000 mm/min y 900 mm/min

Otra herramienta para suavizar las exigencias dinámicas es la utilización de filtros. En la figura 7, se ha introducido un filtro pasabajo de orden 5 con frecuencia de corte de 30 Hz en la aceleración de los ejes para el mecanizado del splitter con una pasada. Se muestran la posición y aceleración de los ejes con el correspondiente análisis de Fourier. Como puede apreciarse, el filtrado de las componentes de alta frecuencia de la aceleración supone una reducción de la amplitud de la misma, especialmente en los ejes rotativos y disminuye el problema de la excitación de modos de la máquina por parte de las fuerzas de inercia.

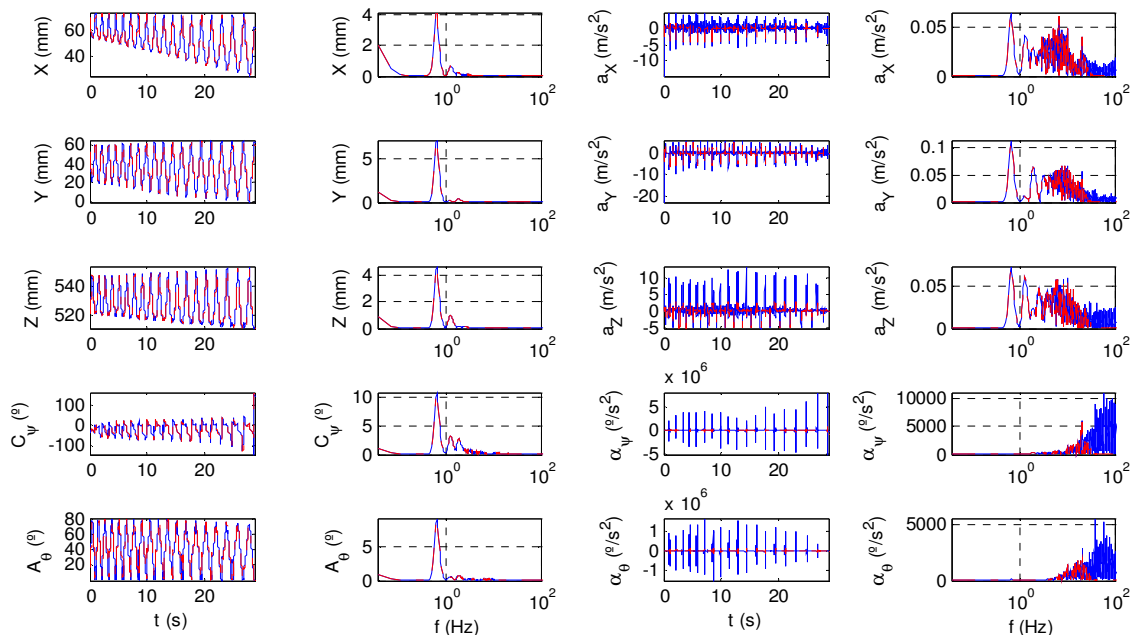


Figura 7. Posición y aceleración en el dominio temporal y frecuencial antes (azul) y después (rojo) de la aplicación de un filtro pasabajo a la aceleración de los ejes



Por otra parte, existen distintas alternativas en la bibliografía para obtener el máximo rendimiento de las prestaciones de la máquina al mecanizar este tipo de piezas. Este tipo de estudios pretende generar trayectorias con una velocidad de avance que sea la máxima que respete en todo momento los límites de velocidad, aceleración y jerk de los accionamientos. Los primeros trabajos de este tipo se realizaron con aplicación a la robótica [3], aunque en los últimos años, han surgido varias publicaciones en el ámbito de la máquina herramienta con vistas a optimizar el mecanizado de moldes y platos de álabes [4].

En cualquier caso, la solución del problema no es trivial y existe variedad de algoritmos de resolución. A modo de ejemplo, en este trabajo se ha introducido un sencillo algoritmo que tiene en cuenta sólo los límites de velocidad de los ejes. Dicho algoritmo recorre la trayectoria a intervalos iguales de longitud  $ds$  y si detecta una velocidad fuera de límites, reduce la velocidad de avance aumentando el intervalo de tiempo  $dt$  que corresponde a  $ds$  proporcionalmente. El resultado para el caso del splitter con una pasada y velocidad de avance 6000 mm/min se puede ver en la figura 8. La velocidad de avance debe reducirse a prácticamente la mitad para que no se sobrepasen los límites de los ejes rotativos. Además en el comienzo y final de la operación la velocidad llega a caer por debajo de los 250 mm/min. Obviamente, esta reducción del avance no es suficiente respecto a los límites de aceleración y jerk de los ejes, que siguen incumpléndose.

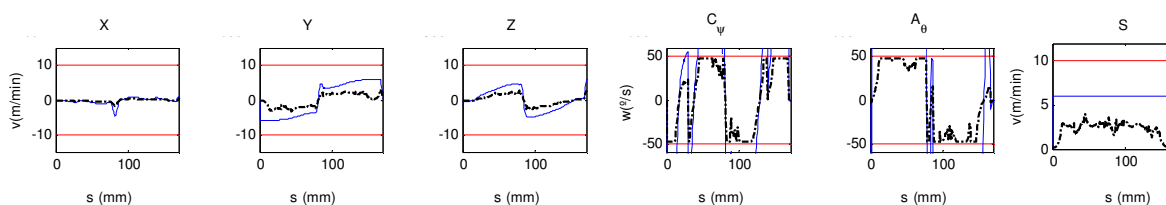


Figura 8. Velocidades en los ejes y velocidad de avance original (azul) y respetando los límites de velocidad de los ejes (negro)

## 6. CONCLUSIONES

El mecanizado de platos de álabes constituye una de las operaciones de mecanizado de mayor valor añadido. Uno de los principales problemas de la operación es la necesidad de realizar interpolaciones en 5 ejes a alta velocidad que exigen unas elevadas prestaciones a los accionamientos de la máquina. En este trabajo se han estudiado 4 casos de mecanizado de álabes para una máquina de 5 ejes para los cuales se han cuantificado las demandas de velocidad, aceleración y jerk para diferentes valores del avance. Se ha comprobado que incluso para velocidades de avance reducidas, las exigencias dinámicas son superiores a las prestaciones de los accionamientos, especialmente las de los ejes rotativos. Además, se ha comprobado la necesidad de utilizar filtros para suavizar la trayectoria con el objeto de evitar que las fuerzas de inercia de los accionamientos exciten los modos de vibración de la máquina herramienta.

## 7. REFERENCIAS

- [1] J.P. Davim. *Machining of complex sculptured surfaces*, Springer, ISBN 978-1-4471-2355-2, (2012).
- [2] Fagor Automation, *Manual de programación del CNC 8035*.
- [3] J.E. Bobrow, S. Dubowsky, J. Gibson, *Time-optimal control of robotic manipulators along specified paths*, I. J. of Robotics Research, 4 (1985), 3-17.
- [4] B. Sencer, Y. Altintas, E. Croft, *Feed optimization for five axis CNC machine tools with drive constraints*, I. J. of Machine Tools & Manufacture, 48 (2008), 733-745.

## 8. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen su apoyo al Ministerio de Ciencia e Innovación de España, proyecto DPI2011-22955, al Fondo FEDER de la UE y al Gobierno Vasco por el proyecto IT445-10. Asimismo agradecen al profesor L. N. López de Lacalle sus enciclopédicas aportaciones en materia de Máquina Herramienta.