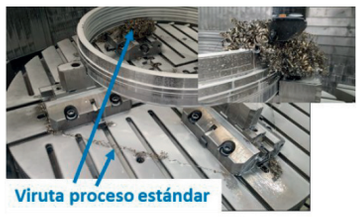
Sistema de rotura de viruta en torneado utilizando los accionamientos de la máquina



Chip breaking system for turning applications using machine drive oscillations

Asier Astarloa[1], Xavier Beudaert[1], Jon-Ander Ealo[3], Jesús Álvarez[2], María-Helena Fernandes[3] y Jokin Muñoa[1]

[1] IDEKO. Dinámica y Control. Arriaga Industrialdea, 2 - 20870 Elgoibar, Guipuzkoa (España).
[2] SORALUCE. S. Coop. Osintxu Auzoa, s/n Vergara – 20570 Bergara, Guipuzkoa (España).
[3] Universidad del País Vasco. Departamento de Ingeniería Mecánica. Ingeniero Torres Quevedo Plaza, 1 - 48013 Bilbao (España).

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/8818 | Recibido: 02/05/2018 • Inicio Evaluación: 10/05/2018 • Aceptado: 23/07/2019

ABSTRACT

- The quality of many metal removal processes is partially defined by the chip formation process. The creation of long chips is one of the main problems in continuous processes like turning. The long chips can scratch the final part surface and generate production stops for manual chip removal. In this article, a technique called modulation assisted machining is used to vary the chip thickness and force the chip breakage. For the heavy duty applications considered here, the oscillation is generated by the ordinary drives of the machine. The limits of the drives are taken into account and the system is automatically selecting the most appropriate oscillation parameters according to the machine oscillation capability and process parameters. Experimental validations show the effect of this system on the chip length and surface finishing.
- **Keywords:** Turning; chip breakage; machine drives.

RESUMEN

La calidad de muchos procesos de arranque de viruta está parcialmente definida por el proceso de formación de la viruta. La creación de viruta larga es uno de los principales problemas en procesos continuos como el torneado. Las virutas largas rayan la superficie final de la pieza y generan paradas de producción para su extracción manual. En este artículo, se aplica el mecanizado asistido por modulación para forzar su rotura. La oscilación es generada por los propios accionamientos de la máquina para las aplicaciones de mecanizado pesado consideradas en este artículo. Los límites de los accionamientos se calibran en una primera fase. Posteriormente, el sistema selecciona automáticamente los parámetros de oscilación más apropiados según la capacidad de oscilación de la máquina y los parámetros del proceso. Las validaciones experimentales muestran el efecto positivo de este sistema reduciendo la longitud de la viruta y mejorando la evacuación de la misma.

Palabras clave: Torneado, rotura de viruta, accionamientos.

1. INTRODUCCIÓN

La productividad de las máquinas herramienta está limitada por diferentes factores como la rugosidad, la presencia de vibraciones, la potencia del husillo, la integridad superficial y la vida útil de las herramientas. El control de la formación de la viruta y su longitud también es un problema crítico en el caso de células desatendidas de producción continua. De hecho, para procesos como el torneado, a menudo se requieren paradas de producción para eliminar las virutas del área de trabajo y esto obstaculiza la automatización del proceso. Además, una longitud de viruta excesiva pone en peligro el acabado final de la pieza mecanizada debido a las marcas que se generan al enrollarse la viruta alrededor de la pieza y la herramienta. Finalmente, una evacuación de viruta inadecuada produce, a la larga, atascos en el extractor de viruta y roturas en las cubiertas telescópicas de la máquina. El presente trabajo propone una técnica que permite controlar la generación de viruta en casos en los que se detecte una longitud excesiva.

En el estado del arte se han propuesto diferentes técnicas para reducir y controlar la longitud de viruta generada en los procesos de mecanizado. En un principio, se trata de controlar la generación de viruta mediante la optimización de parámetros de mecanizado como la velocidad de corte, el avance por vuelta y la profundidad de corte [1], pero en el caso de materiales de baja maquinabilidad la vida de la herramienta limita el rango de actuación [2]. Por otra parte, las herramientas de torneado modernas constan de geometrías especiales que promueven la rotura de viruta en la cara de desprendimiento [3]. Estos elementos denominados rompevirutas acentúan la flexión de la viruta deformada para promover su ruptura [4]. La simulación mediante el método de elementos finitos (MEF) de la formación de viruta ha permitido optimizar la forma de los rompevirutas y aumentar su efectividad [5]. El refrigerante a alta presión también es una buena opción a la hora de romper viruta en algunos procesos de torneado de materiales dúctiles de baja maquinabilidad como aleaciones de titanio [6] y de base níquel [7]. La aplicación del refrigerante a alta presión mejora la evacuación de viruta a costa de aumentar el gasto energético y el coste de la máquina. Por lo tanto, pese a que el uso combinado de estas tres soluciones de proceso reduce la longitud de viruta, la evacuación de viruta sigue siendo un problema en células de torneado desatendidas. Frente a esta limitación, el mecanizado asistido por modulación permite controlar directamente la longitud de viruta.

Son numerosos los casos en los que se ha utilizado la superposición de una vibración para mejorar el mecanizado. Estas aplicaciones se dividen en dos grupos: el mecanizado asistido por vibración de alta frecuencia (>1kHz) y baja amplitud [8], y el mecanizado asistido por modulación de baja frecuencia y alta amplitud [9]. Estas técnicas han sido aplicadas para propósitos muy diferentes, como generar un acabado superficial de alta calidad [10], generar micro patrones en la superficie [11], generar partículas de cierta geometría y aumentar la vida útil de la herramienta. El trabajo presentado en este artículo se centra en producir la rotura de vi-

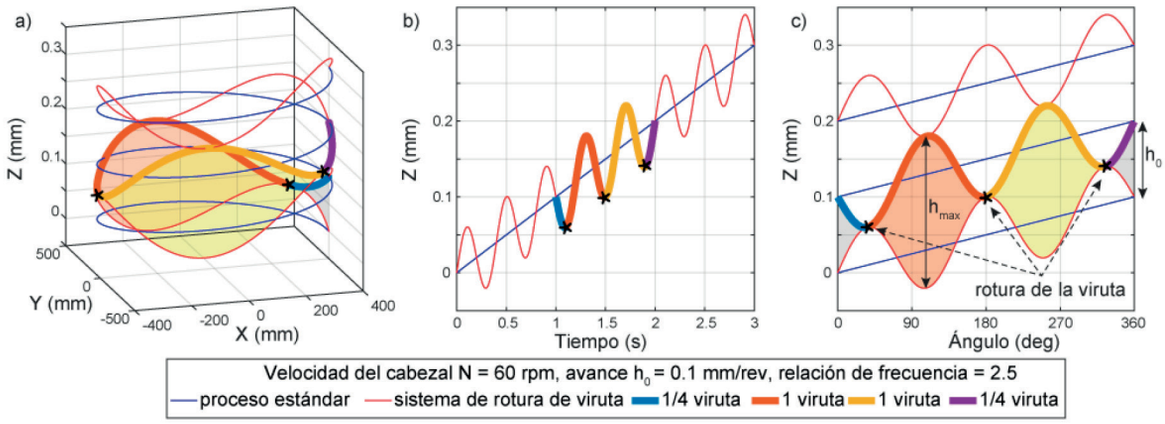


Fig. 1: Descripción general del sistema de rotura de viruta que utiliza el mecanizado asistido por modulación

ruta utilizando oscilaciones de alta amplitud y baja frecuencia que se crean en el mecanizado asistido por modulación.

Mann et al. [9] analizaron en detalle la formación de viruta y los beneficios del mecanizado asistido por modulación, teniendo en cuenta el desgaste de la herramienta y la textura de la superficie generada. Gao et al. [12, 13] analizaron la topografía de la superficie y los efectos térmicos. Para la mayoría de las aplicaciones, la oscilación se genera mediante un fast tool servo [13] o un actuador dedicado [14, 15], los cuales introducen un coste adicional y limitan la dirección de actuación.

Los propios accionamientos de la máquina tienen, teóricamente, la capacidad de realizar la oscilación requerida con el objetivo de producir la rotura de viruta. De hecho, los accionamientos de las máquinas son potentes actuadores que se utilizan para diferentes propósitos, como la generación de trayectorias complejas [16], la supresión de vibraciones [17], así como la rotura de viruta. Chabra et al. [18] utilizó accionamientos lineales específicamente diseñados para operaciones de taladrado. Recientemente, el fabricante de máquina herramienta Citizen ha introducido el corte asistido por vibración de baja frecuencia (LFV) [19] en su máquina de torneado de alta precisión. Varias patentes también están relacionadas con esta tecnología [20, 21]. Sin embargo, el concepto general de superponer una oscilación sobre la trayectoria de mecanizado con el fin de romper la viruta se aplica libremente.

El objetivo del trabajo presentado ha sido analizar las posibilidades que ofrecen los accionamientos de las máquinas herramienta para producir viruta discontinua en operaciones de torneado en piezas de tamaño medio-grande. Las principales contribuciones de este trabajo provienen de la caracterización de la capacidad de oscilación de la máquina, la selección automática de los parámetros de oscilación en función de las limitaciones del proceso y de la máquina, y finalmente, la orientación a tornos verticales de tamaño medio-grande.

El artículo se organiza de la siguiente manera: primero, se presenta una introducción general sobre el mecanizado asistido por modulación para la rotura de viruta. Después, se evalúa la capacidad de oscilación de dos máquinas y se presenta la selección automática de los parámetros de oscilación. Finalmente, se realiza la implementación y validación experimental para operaciones de torneado.

2. MECANIZADO ASISTIDO POR MODULACIÓN PARA LA GENERACIÓN DISCONTINUA DE VIRUTA

La vibración asistida por modulación añade una oscilación sobre el movimiento de la herramienta para que la plaquita deje de cortar periódicamente. Dicha oscilación adicional se genera en la dirección de la velocidad de corte (modulación de la velocidad), en la dirección de la profundidad de corte o en la dirección del avance (modulación del avance). La modulación de la velocidad no es adecuada para la rotura de la viruta ya que la sección de viruta se mantiene constante, aunque se utiliza para distorsionar el efecto regenerativo y evitar el retemblado [22]. La modulación de la profundidad de corte en cambio es efectiva para la rotura de la viruta, pero ofrece como resultado una superficie ondulada, con la consecuente necesidad de tener que ser limpiada mediante una pasada de acabado. Por lo tanto, se ha optado por la modulación del avance debido a que no afecta a la geometría de la superficie generada si se toman precauciones (ver sección 4.2).

En la modulación del avance, se genera una oscilación en la dirección del avance que da lugar a un avance relativo entre la herramienta y la pieza nulo en algún momento. La Figura 1 muestra la trayectoria de la herramienta en un proceso estándar en azul y la correspondiente a la modulación en avance en rojo. En el ejemplo descrito se ha seleccionado una relación entre la frecuencia de oscilación (f_{osc}) y la frecuencia de rotación de la pieza (f_{rot}) de 2.5. Por lo tanto, con el sistema de rotura de viruta, se añade una oscilación sinusoidal sobre el desplazamiento lineal. Las relaciones de frecuencia (f_{osc}/f_{rot}) correspondientes a un número entero + 0.5 permiten que el máximo y el mínimo entre pasadas sucesivas coincidan y romper la viruta con la mínima amplitud de oscilación como se verá en la sección 4.1. En la Figura 1c se muestra la trayectoria de la herramienta en una revolución, y se observa que en lugar de tener un avance por vuelta constante h_0, el sistema de rotura de viruta produce una variación del espesor de viruta. Las líneas gruesas de color representan las 2.5 virutas que se generan de promedio durante una revolución de la pieza debido a que la relación de frecuencia es 2.5.

En este estudio, la oscilación es generada por los accionamientos ordinarios de máquina basados en husillos a bolas y en piñón-cremallera. Por lo tanto, es importante caracterizar la capacidad de oscilación de la máquina para definir el rango de trabajo de esta técnica cuando se usan estos actuadores ordinarios. En las siguientes secciones se estudiarán las posibilidades que ofrecen para operaciones de torneado el piñón cremallera en ejes de penetración y el husillo de bolas en accionamientos verticales.

3. EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE OSCILACIÓN DE LA MÁQUINA

Para evaluar la capacidad de oscilación de una máquina, se realiza una prueba en la que las amplitudes y frecuencias de oscilación varían de 0 a 0.6 mm y de 1 a 4 Hz, respectivamente.

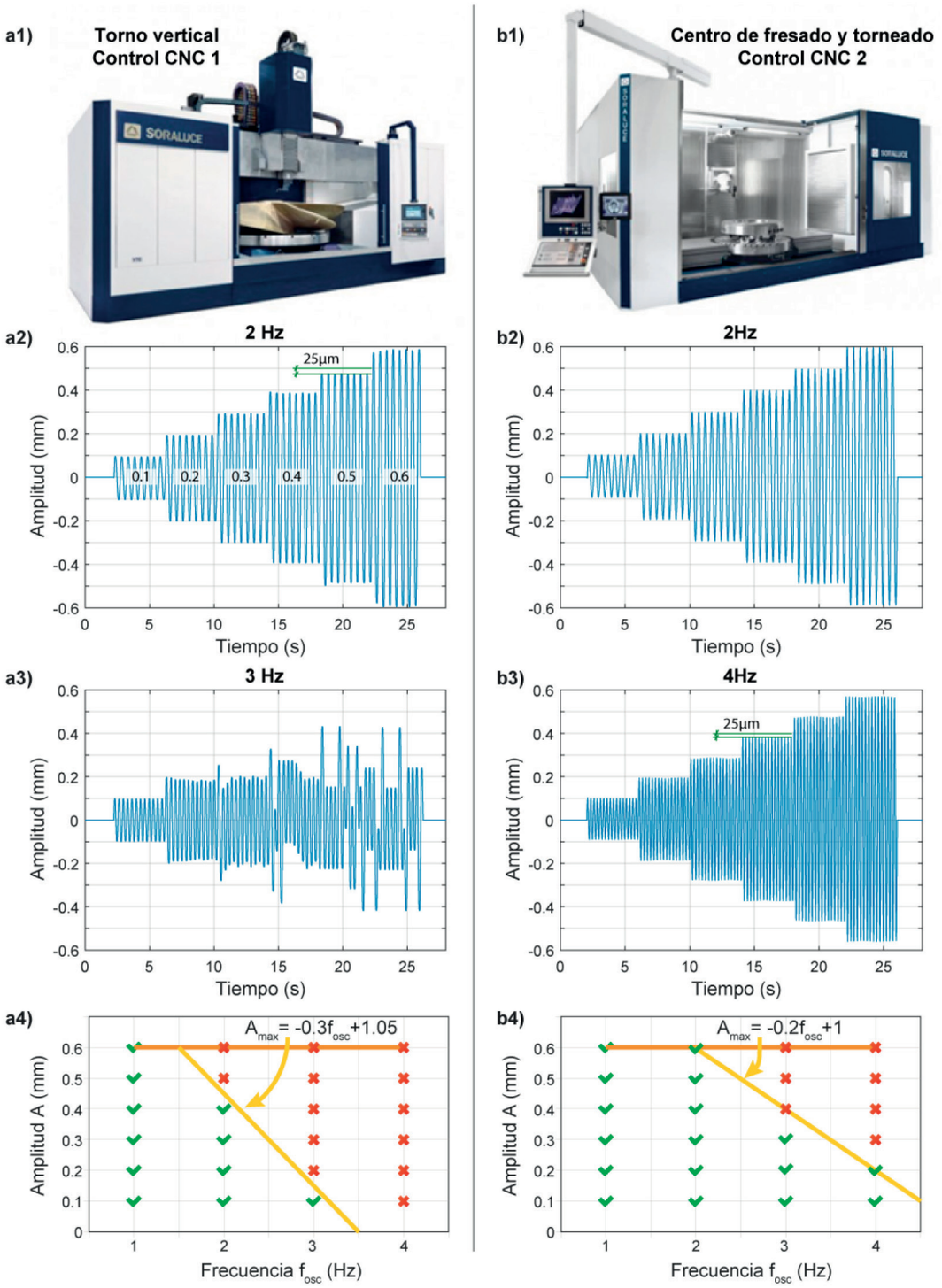


Fig. 2: Caracterización de la capacidad de oscilación de la máquina

Para cada frecuencia comandada se va aumentando la amplitud de la sinusoide y se observa, mediante las señales de la regla de medición, si la máquina es capaz de reproducir la sinusoide (ver gráficas a2, a3, b2 y b3 de la Figura 2).

Los resultados de la caracterización se resumen en los graficas a4 y b4 de la Figura 2. La oscilación alcanzable está limitada por el eje de peor comportamiento, si bien en general los ejes de la máquina tienen un comportamiento similar. Matemáticamente el límite de oscilación A_{max} se define en función de la frecuencia mediante una recta de pendiente negativa en el diagrama frecuencia/amplitud. Además de la limitación de la máquina, también se agrega una limitación de proceso para garantizar que la amplitud de oscilación no sea mayor de 0.6 mm. Esta restricción se debe a que grandes avances reducen la vida útil de la herramienta debido a una excesiva carga en el filo de corte.

La capacidad de oscilación de la máquina está limitada por la dinámica de los accionamientos y por el ajuste de las ganancias de la regulación de los ejes. Sin embargo, la principal limitación proviene de las posibilidades de implementación ofrecidas por los diferentes Controles Numéricos por Computadora (CNC). De hecho, los CNC filtran internamente los puntos de referencia adicionales introducidos para preservar la máquina y limitan la capacidad de oscilación. Por ejemplo, las consignas adicionales están limitadas por las restricciones sobre la aceleración y sobreaceleración (jerk) de cada eje de máquina [23,24].

La Figura 2 muestra los resultados obtenidos al caracterizar la capacidad oscilatoria de dos máquinas diferentes. Por un lado, se ha seleccionado un centro de torneado vertical equipado con un control CNC determinado, al que se denominará control CNC 1, que comanda a su vez dos piñones precargados sobre la misma cremallera en el eje de penetración X y un husillo de bolas en el eje vertical Z. Por otra parte, se ha estudiado también las posibilidades de un centro de torneado multifuncional equipado con un control CNC diferente al anterior (CNC 2), piñón cremallera en el eje de penetración X y husillo de bolas en el eje vertical Z.

En la Figura 2-a2, se describe primeramente el caso del eje vertical del torno correspondiente a un husillo a bolas (CNC1). Se observa que con una consigna de 2 Hz y 0.5 mm no se alcanza la amplitud programada de oscilación. Por lo tanto, el límite se establece para esta frecuencia en 0.4mm. A 3 Hz, para este caso, la oscilación se distorsiona completamente al superar la amplitud de onda de 0.2mm. De este modo se consigue definir los límites de la ondulación aplicable.

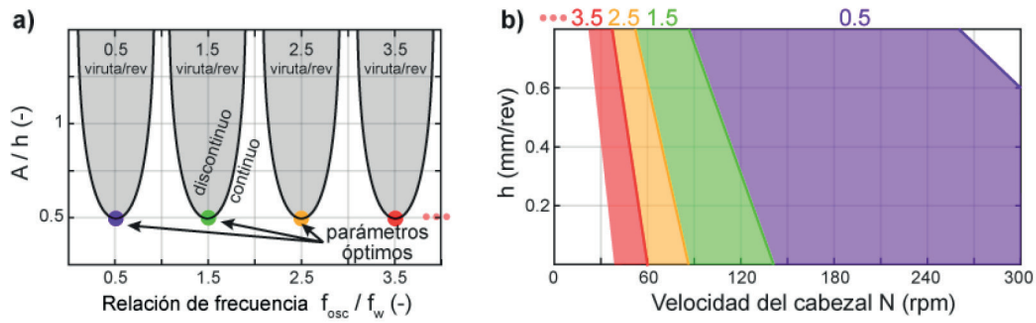


Fig. 3: Selección automática de los parámetros óptimos de oscilación

En el caso de la máquina multifunción (CNC 2) tiene la capacidad de realizar oscilaciones de mayor amplitud y frecuencia sin distorsión. Cuando se introduce la frecuencia de 2Hz la máquina consigue replicar la oscilación con la amplitud deseada (Figura 2-b2). De hecho, cuando no se logra la amplitud programada de oscilación ésta no se distorsiona (Figura 2-b3) y esto permite compensar la amplitud real incrementando el avance teórico del comando original. En la inversión, la fricción y la holgura distorsionan levemente la oscilación, pero no tienen un impacto importante para este tipo de aplicaciones. Por lo tanto, se puede concluir que la respuesta de la máquina con CNC2 es mejor como se ve al comparar las gráficas a4 y b4 de la Figura 2.

4. SELECCIÓN AUTOMÁTICA DE LOS PARÁMETROS DE OSCILACIÓN PARA OPERACIONES DE TORNEADO

La caracterización desarrollada en la sección anterior define para cada máquina los límites de la amplitud y frecuencia. Una vez se conoce esta información es posible seleccionar automáticamente los parámetros de oscilación óptimos considerando los límites oscilatorios de la máquina y los parámetros del proceso de corte. Además, la dirección de oscilación también se selecciona automáticamente. En este apartado se definirán las directrices para la selección de estos parámetros.

4.1. SELECCIÓN DE LA AMPLITUD Y FRECUENCIA

A la hora de determinar las condiciones óptimas de modulación conviene considerar dos parámetros adimensionales: la amplitud de oscilación adimensional (A/h) y la frecuencia de oscilación adimensional (f_{osc}/f_{rot}). La amplitud adimensional nos define la relación entre la amplitud de oscilación (A) y el espesor de viruta no deformado (h). Por otra parte, la frecuencia de oscilación adimensional relaciona la frecuencia de oscilación con la frecuencia de giro del torno.

Como se muestra en [9], el límite entre la formación de una viruta continua o discontinua mediante la aplicación de la modulación está representado por una serie de lóbulos (ver Figura 3-a) en el diagrama que considera la amplitud de modulación adimensional frente a la frecuencia de modulación adimensional. En el primer lóbulo, se genera un promedio de 0.5 virutas por revolución, en el segundo lóbulo se generan 1.5 virutas, y así sucesivamente. La cantidad de virutas generadas por revolución va aumentando con la frecuencia de oscilación adimensional. La longitud de viruta no deformada se estima a partir del diámetro de pieza D y la relación de frecuencia de oscilación mediante la siguiente fórmula:

$$\text{longitud de viruta} = \frac{\pi \cdot D}{f_{osc}/f_{rot}} \quad (1)$$

Cuanto mayor es la frecuencia de oscilación adimensional, menor es la longitud de la viruta. Por lo tanto, el sistema selecciona automáticamente la relación de frecuencia de oscilación más alta posible teniendo en cuenta las limitaciones de la capacidad de oscilación de la máquina. Según Mann en [9], la amplitud mínima de oscilación (A_{min}) para producir virutas discontinuas se obtiene cuando el espesor instantáneo de viruta es cero (h=0). Esta amplitud crítica viene dada por la fórmula (2), siendo Φ el cambio de fase entre pasadas:

$$A_{min} = \frac{1}{2} \cdot \frac{h_0}{\sin(\Phi/2)} \quad (2)$$

Esta ecuación define la forma de lóbulo presentada en la Figura 3-a. De este modo, la amplitud de oscilación mínima se obtiene cuando los valles y los picos de la oscilación coinciden angularmente ($\Phi=\pi$). Las relaciones de frecuencia (f_{osc}/f_{rot}) correspondientes a un número entero + 0.5 permiten que el máximo y el mínimo entre pasadas sucesivas coincidan ($\Phi=\varpi$). En esa condición, la amplitud de oscilación mínima absoluta es:

$$A_{min\,absoluta} = \frac{h_0}{2} \quad (3)$$

Cuando la modulación está en fase con la frecuencia de giro los picos coinciden y, al ser el desfase nulo ($\Phi=0$), no es posible romper viruta. Esto sucede cuando las relaciones de frecuencia (f_{osc}/f_{rot}) coinciden con un número entero. Estos ejemplos demuestran que la elección de la frecuencia de oscilación es vital para poder generar viruta discontinua.

Para las operaciones de torneado consideradas en este artículo, el sistema de rotura de viruta selecciona automáticamente las condiciones de oscilación para que siempre se use la amplitud mínima de oscilación. La amplitud de oscilación se establece igual a la mitad del avance por vuelta programado. Esta amplitud se incrementa por el factor de amplificación de amplitud como se presenta en la Sección 5.1. La relación de frecuencia (f_{osc}/f_{rot}) correspondientes a un número entero + 0.5 más próxima al límite de la máquina es automáticamente seleccionada (Figura 2-a4).

4.2. DIRECCIÓN DE OSCILACIÓN

Para proporcionar una solución automática, la dirección de oscilación se obtiene del movimiento inicialmente programado. De hecho, el programa implementado en el control numérico lee continuamente la función "distancia por recorrer", en inglés "*distance to go*", para cada eje de la máquina con la intención de evaluar la dirección del movimiento. Por lo tanto, la oscilación se proyecta en la dirección del movimiento subyacente por lo que no hay necesidad de solicitar una parametrización adicional al usuario final.

Debido a que el sistema no tiene ninguna información sobre la posición de la plaquita respecto a la pieza, la oscilación se des-

activa al final y al comienzo de cada bloque para que ésta nunca exceda el recorrido inicialmente programado. De hecho, sin dicha acción, se compromete la geometría final de la pieza debido a desviaciones en la trayectoria original. Por ejemplo, en la Figura 1-b, el movimiento de oscilación es inferior a Z=0mm al comienzo y superior a Z=0.3mm al final del desplazamiento. Al detener la oscilación al principio y al final de cada bloque del código numérico (CN), el sistema garantiza que se conserve la geometría final de la pieza. Sin embargo, esta acción hace que se produzca una viruta de mayor longitud en las transiciones entre bloques al no forzarse la rotura mediante modulación al final del bloque.

5. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL EN TORNEADO

5.1. IMPLEMENTACIÓN EN CNCS COMERCIALES

El sistema de rotura de viruta ha sido concebido como una opción de software que el usuario activa en cualquier momento y reduce la longitud de la viruta. Inicialmente, este sistema se ha implementado en dos controles numéricos (CNC 1 y CNC 2).

Para la gestión de la función, se ha creado un interfaz de usuario específico para la activación/desactivación del sistema de rotura de viruta, así como para el ajuste de un factor de amplificación de amplitud (Figura 4). El usuario final solo tiene que activar el sistema y ajustar el factor de amplificación. El resto de los parámetros se definen automáticamente. Para ello, el fabricante de la máquina introduce los límites de oscilación obtenido gracias a la caracterización dinámica (sección 3). Esta caracterización consigue definir la línea límite representada en las gráficas a4) y b4) de la Figura 2. El sistema obtiene del CNC el avance y la velocidad de giro y define automáticamente la amplitud y frecuencia de modulación (ver sección 4.1 y ecuación 3). La dirección de modulación se obtiene gracias a la función "*distance to go*" del CNC.

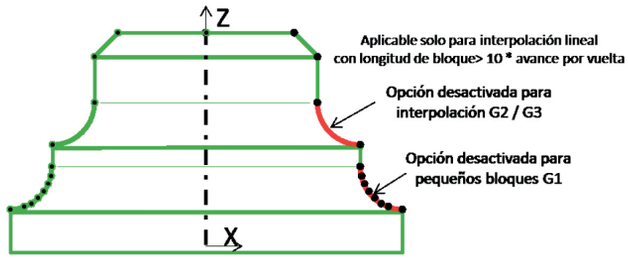
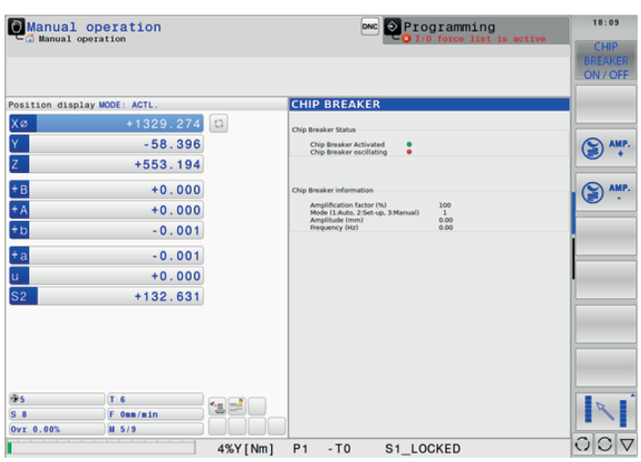


Fig. 5: Limitación a la interpolación lineal

Por defecto, el factor de amplificación de amplitud se establece en 100%. Este factor se aumenta para incrementar la amplitud de oscilación en el caso de que la viruta siga siendo continua después de la activación de la modulación. Las pruebas experimentales han mostrado que la viruta es extremadamente fina pero continua cuando se utiliza la amplitud de oscilación que produce un espesor de viruta teórico igual a cero. Este fenómeno se produce debido a diversos factores como la flexibilidad de la herramienta o de la pieza, una ligera desincronización de la oscilación respecto a la revolución de la pieza o del hecho de que no se logre la amplitud de oscilación programada. Para hacer frente a esos impedimentos, se utiliza el factor de amplificación de oscilación para aumentar la amplitud de oscilación y asegurar que se genera una viruta discontinua. Este factor de oscilación se manipula desde el programa de pieza o mediante teclas, de modo que el operador ajuste el sistema de rotura de viruta durante el mecanizado en función de la formación de viruta.

Es aconsejable activar esta opción solo cuando se generan virutas largas y utilizar el factor de amplificación más bajo posible. En la Figura 4 se muestran capturas de pantalla y ejemplos del programa CN para los controladores CNC 1 y CNC 2. De hecho, este sistema no aumenta el tiempo de mecanizado, pero la oscilación aumenta






```
G1 X900 Z50 F1500
M3 S60
Z100 F500
G95; feed mm/rev
START_CHIP_BREAKER; chip breaker is started
STOPRE
$AC_PARAM[22]=140; amp. amplification factor (%)
ACTIVATE_CHIP_BREAKER; oscillation is applied
Z120 F=0.1
DEACTIVATE_CHIP_BREAKER; oscillation is stopped
Z100
...
STOP_CHIP_BREAKER; chip breaker is stopped
M5
M30
```

```
FUNCTION MODE TURN
FUNCTION TURNDATA SPIN VCONST:OFF S60
CYCL DEF 389; CHIP BREAKER ADJUSTMENT ~
  Q1519=+140;   amp. amplification factor
L  Z+300 R0 FMAX
L  X+800 Y+0 R0 FMAX
M136 ; feed MM/REV
M432 ; ACTIVATE CHIP BREAKER
L  Z+200 R0 F0.2
...
M433 ;DEACTIVATE CHIP BREAKER
M5
M30
```

Fig. 4: Implementación del sistema de rotura de viruta para CNC 1 y CNC 2

la carga máxima en la herramienta. Si se define un factor de amplificación del 100%, la herramienta soportará periódicamente un avance por vuelta 2 veces mayor que el programado (tal y como se ve en la Figura 1-c $h_{max}=2h_0$). El usuario debe seleccionar una herramienta capaz de hacer frente a este incremento carga.

En la implementación actual, el sistema de rotura de viruta debe usarse solo para operaciones de torneado con interpolación lineal. Como se muestra en la Figura 5, el sistema adapta automáticamente la oscilación a X, Z o interpolaciones XZ combinadas. Para asegurarse de que la oscilación no produce sobrecortes, el sistema se desactiva automáticamente al principio y al final de cada bloque. Por lo tanto, no se recomienda utilizar la opción de rotura de viruta para la interpolación de contornos con una longitud de bloque inferior a 10 veces el avance por vuelta programado. Las interpolaciones circulares no son compatibles con el sistema actual debido a que es necesario obtener información adicional del CNC. Sin embargo, si se conocen los parámetros de la trayectoria circular, la oscilación podría seguir la geometría circular inicial para romper la viruta (ver Figura 5).

El sistema trabaja perfectamente con cualquier modo de avance (G94 mm/min, G95 mm/rev y velocidad de corte constante G96), cualquier avance y cualquier dirección (orientación, giro cilíndrico o interpolaciones XZ), ya que la amplitud de oscilación, frecuencia y dirección son constantemente calculados en tiempo real.

5.2. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

El sistema de rotura de viruta se ha validado en una operación de cilindrado realizado en el centro de torneado con el control CNC2 caracterizado en la Figura 2-b4, y utilizando la herramienta y las condiciones de corte de la Tabla 1.

El sistema de rotura de viruta automáticamente define la frecuencia y amplitud de oscilación que minimiza la longitud de viruta teniendo en cuenta el avance y la velocidad de giro del proceso de torneado. Para ello, se tiene en cuenta la caracterización de la capacidad de oscilación del centro de fresado y torneado (Figura 2-b4). En este caso, la amplitud máxima obtenible para la máquina con CNC2 está definida por la ecuación 4:

$$\begin{cases} A_{max} = 0.6 & f_{osc} < 2 \\ A_{max} = 1 - 0.2 f_{osc} & f_{osc} \geq 2 \end{cases} \quad (4)$$

Para definir los parámetros de la oscilación, el sistema determina primero la amplitud mínima necesaria para romper viruta. La ecuación 3 define por lo tanto que para un avance por vuelta de 0.15mm es necesaria una amplitud de 0.075mm, y esta a su vez a través de la ecuación 4 establece una oscilación máxima obtenible de 4.625Hz. La relación de frecuencia (f_{osc}/f_{rot}) correspondientes a un número entero +0.5 más próxima al límite es 3.75Hz que corresponde a una relación de 2.5. Por lo tanto, el sistema automático define inicialmente una frecuencia de 3.75Hz y una amplitud de 0.075mm para la modulación. Posteriormente, el factor de amplificación de la amplitud de oscilación se aumenta hasta el 140%

Material	
Referencia	ASTM A-705Tp-630(17-4 PH)-X5CrNiCuNb16-4 EN-10.250-4
Descripción	Acero inoxidable martensítico
Tratamiento térmico	H900
Dureza	45HRC
Herramienta	
Referencia	C6-CRSNL-45065-12ID
Plaquita	RNGN120700 XSYTIN-1
Condiciones de corte	
Velocidad del cabezal	90 rpm/1.5Hz (velocidad de corte≈250 m/min)
Avance	0.15mm/rev
Profundidad de pasada Diámetro pieza	1mm al radio 880mm
Lubricación	Taladrina baja presión

Tabla 1: Herramienta y condiciones de corte

para asegurar la rotura de la viruta a pesar de las deformaciones. Por lo tanto, las pruebas de verificación se han realizado con un avance de 0.1mm y una frecuencia de oscilación de 3.75Hz.

Cuando se activa el sistema de rotura de viruta, la forma de la viruta cambia de virutas continuas largas a virutas discontinuas. El objetivo del sistema de rotura de viruta no es producir virutas extremadamente pequeñas, sino producir virutas discontinuas de modo que no se mantengan en el área de corte alrededor de la plaquita (Figura 6-a) y que sean evacuadas automáticamente por el extractor de viruta. La Figura 6-b muestra la diferencia entre las virutas continuas y discretas generadas utilizando el sistema de rotura de viruta presentado en este artículo.

Las mediciones realizadas con un rugosímetro siguiendo la norma ISO 4288:1996 [25] han demostrado que el acabado de la superficie no varía en exceso cuando se activa el sistema de rotura de viruta (Figura 7-a). La Figura 7-b muestra el perfil de rugosidad con y sin sistema de rotura. La rugosidad media aritmética Ra es de 0.49µm con el proceso estándar y 0.62µm con el sistema de rotura de viruta (un 27% peor).

6. CONCLUSIONES

Se ha presentado un sistema de rotura de viruta capaz de reducir la longitud de la viruta durante las operaciones de torneado. Este sistema utiliza los propios accionamientos de la máquina para producir una oscilación en la dirección del avance, de modo que la herramienta abandona periódicamente el corte y produce virutas discontinuas.

En la metodología propuesta, se realiza inicialmente una caracterización de la capacidad de oscilación de la máquina, de manera que el sistema selecciona automáticamente los parámetros de oscilación alcanzables. La dirección de oscilación también se obtiene automáticamente a partir de la trayectoria de la herramienta inicialmente programada. Las principales aportaciones de

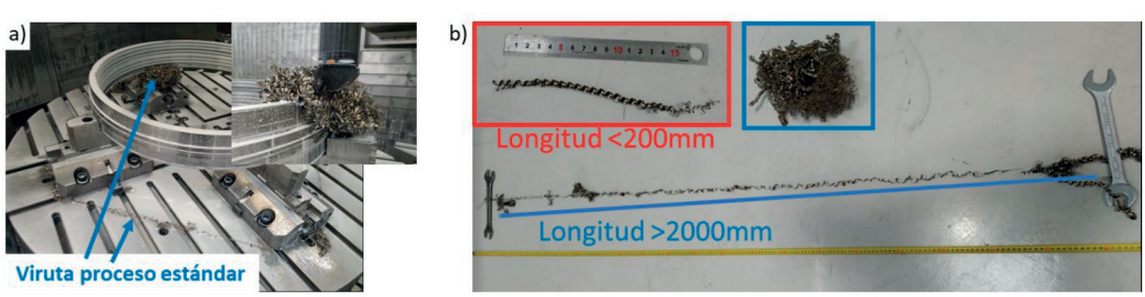


Fig. 6: Formación de virutas para el proceso estándar (en azul) y con rotura de viruta (en rojo)

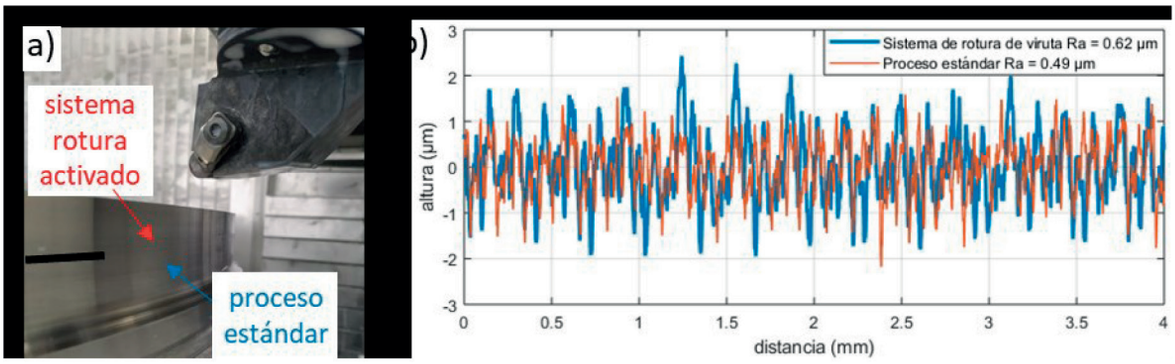


Fig. 7: Análisis del acabado superficial. para el proceso estándar (en azul) y con rotura de viruta (en rojo)

este trabajo respecto al estado del arte se pueden sintetizar en los siguientes tres puntos:

- La técnica propuesta permite reducir la longitud de viruta en tornos verticales. Las máquinas de torneado vertical generalmente están diseñadas para piezas de gran tamaño (diámetro superior a 500 mm) que, por lo tanto, requieren velocidades bajas de rotación para alcanzar la velocidad de corte adecuada. Gracias a estas bajas velocidades de rotación, los accionamientos estándares de piñón-cremallera o husillo a bolas tienen una capacidad de oscilación suficiente para producir virutas discontinuas.
- Las validaciones experimentales muestran que es importante dar al operario la posibilidad de aumentar la amplitud de oscilación en caso de que el sistema de rotura de viruta no consiga producir virutas discontinuas con la amplitud de oscilación nominal.
- Las pruebas experimentales han demostrado que se consigue reducir la longitud de viruta a costa de un empeoramiento en la rugosidad de la superficie torneada (<30%).

La línea de trabajo a futuro tendrá como objetivo la integración de las interpolaciones circulares en el torneado y la aplicación de esta técnica a las operaciones de taladrado. Además, se llevarán a cabo pruebas de corte más exhaustivas para evaluar el efecto del sistema de rotura de viruta en la vida útil de la herramienta.

Finalmente, hay que decir que esta misma tecnología también es aplicable a tornos orientados a piezas de menor diámetro como es el caso de tornos horizontales del sector de automoción, pero requiere accionamientos con un ancho de banda mayor basados en motores lineales.

REFERENCIAS

[1] Jawahir IS, "On the Controllability of Chip Breaking Cycles and Modes of Chip Breaking in Metal Machining". CIRP Annals.Vol.39.pp.47-51.1990. DOI: https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61000-2
[2] Kitagawa T, Kubo A, Maekawa K, "Temperature and wear of cutting tools in high-speed machining of Incone1718 and Ti-6A1-6V-2Sn". Wear, Vol. 202.pp 142-148.1997. DOI: https://doi.org/10.1016/S0043-1648(96)07255-9
[3] Lotfi M, Farid AA, Soleimanimehr H. "The effect of chip breaker geometry on chip shape, bending moment, and cutting force: FE analysis and experimental study". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Vol. 78.pp 917-925.2015. DOI https://doi.org/10.1007/s00170-014-6676-8
[4] Jawahir IS, van Luttervelt CA. "Recent Developments in Chip Control Research and Applications". CIRP Annals. Vol. 42.pp. 659-693.1993. DOI: https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62531-1
[5] Gonzalo O, Quintana I, Etxarri J. "FEM Based Design of a Chip Breaker for the Machining with PCD Tools". Advanced Materials Research. Vol. 223.pp. 131-141.2011. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.223.133
[6] Palanisamy S, McDonald SD, Dargusch MS. "Effects of coolant pressure on chip formation while turning Ti6Al4V alloy". Vol. 49.pp. 739-743.2009. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.02.010
[7] Machado AR, Wallbank J , Pashby IR, Ezugwu EO. "Tool performance and chip control when machining Ti6Al4V and Inconel 901 using high preassure coolant supply". Machining Science and Technology, Vol 2.pp. 1-12. DOI: https://doi.org/10.1080/10940349808945655
[8] Brehl DE, Dow TA. "Review of vibration-assisted machining". Precision engineering. Vol.32.p.153-172.2008. DOI: https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2007.08.003
[9] Mann JB, Guo Y, Saldana C, Compton W.D, Chandrasekar S "Enhancing material removal processes using modulation assisted machining". Tribology International. Vol.44.pp 1225-1235.2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.triboint.2011.05.023
[10] Smith K, Assaid T, McFarland J, Tursky D, Barkman "Simulating the effect of modulated tool-path chip breaking on surface texture and chip length". Proceedings of the depleted uranium users conference, Oak Ridge USA, W 2010.
[11] Gandhi R, Sebastian D, Basu S, Mann J, Iglesias P, Saldana C "Surfaces by vibration/modulation-assisted texturing for tribological applications". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Vol.85. p.909-920. 2015. DOI: https://doi.org/10.1007/s00170-015-7968-3
[12] Gao Y, Sun R. L, Chen Y. N, Leopold J "Mechanical and thermal modeling of modulation-assisted machining". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Vol.86. p.2945-2959. 2016. DOI: https://doi.org/10.1007/s00170-016-8421-y
[13] Gao Y, Sun R, Chen Y, Leopold J "Analysis of chip morphology and surface topography in modulation assisted machining". International Journal of Mechanical Sciences. Vol.111. p.88-100. 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.03.025
[14] M4 Science www.m4sciences.com/
[15] Mitis www.mitis.fr
[16] Altintas Y, Verl A, Brecher C, Uriarte L, Pritschow G "Machine tool feed drives". CIRP Annals-Manufacturing Technology. Vol.60. p.779-796. 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.05.010
[17] Munoa J, Beudaert X, Erkorkmaz K, Iglesias A, Barrios A, Zatarain M "Active suppression of structural chatter vibrations using machine drives and accelerometers". CIRP Annals-Manufacturing Technology. Vol.64. p.385-388. 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.106
[18] Chabra PN, Ackroyd B, Compton WD, Chandrasekar S "Low-frequency modulation-assisted drilling using linear drives". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. Vol.216. p.321-30. 2002. DOI: https://doi.org/10.1243/0954405021519997
[19] Citizen, Low frequency vibration cutting www.citizenmachinery.co.uk/lfv-technology/
[20] Dombrowski T, Klosterhalfen H "Method and apparatus for achieving chip separation while machining work pieces". US 4693146 A.1987.
[21] Mann JB. "Tool holder assembly and method for modulation-assisted machining". US7587965, 2009.
[22] Bediaga I, Zatarain M, Munoa J, Lizarralde R. "Application of continuous spindle speed variation for chatter avoidance in roughing milling", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 225. p 631-640.2011. DOI: https://doi.org/10.1177/2041297510394075.
[23] "Modules and PLC operands" en "Technical manual TNC 640", Johannes Heidenhain GmbH, Traunreut, Germany, 2015.
[24] "Synchronized actions Function Manual", 6FC5397-5BP40-2BA0, Siemens AG, Erlanger, Germany, 2011.
[25] "Especificación geométrica de producto (GPS). Calidad superficial: Método del perfil. Reglas y procedimientos para la evaluación del estado superficial. (ISO 4288:1996)". UNE-EN ISO 4288:1998.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) a través del proyecto TiMachina (IDI-20190416). A los autores les gustaría agradecer la colaboración del Centro de Fabricación Avanzada Aeronáutica (CFAA) en esta investigación.