

## Monitorización en línea del proceso en el mandrinado de componentes de gran tamaño

M. Arsuaga Berrueta <sup>(1)</sup>, R. Lobato González <sup>(1)</sup>, A. Gorriño Vicandi <sup>(1)</sup>, I. Sanz Achurra <sup>(1)</sup>,  
A. Rodríguez Ezkerro <sup>(1)</sup>

(1) Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad del País Vasco – Euskal Herriko Unibertsitatea  
mikel.arsuaga@ehu.es

*En este trabajo se presenta un sistema innovador para el control de calidad en el proceso de mandrinado de grandes componentes con el objetivo de obtener cero piezas con defecto. En los sistemas tradicionales, el control de calidad se realiza al final de la línea de fabricación de forma que un defecto producido en un estadio inicial se propaga a lo largo de todo el proceso. El impacto de las piezas defectuosas en la producción es especialmente importante en sectores como el eólico, aeronáutico, químico, etc. debido al gran tamaño y elevado coste de producción de las mismas. Por otra parte, el ajuste de la producción mediante el control estadístico del proceso resulta poco eficiente debido a la complejidad de las piezas, alto número de parámetros a controlar y al tamaño de las series generalmente cortas.*

*La nueva metodología está basada en la modelización del proceso de corte y en su monitorización en línea mediante hardware de telemetría desarrollado específicamente e integrado en el cabezal de mandrinado. Mediante las lecturas de los diferentes sensores y la modelización previa del proceso, el sistema reajusta la estrategia de mecanizado y los parámetros de trabajo para corregir posibles desviaciones debidas a desgastes de herramienta, flexiones de componentes mecánicos y vibraciones.*

### 1. INTRODUCCIÓN

En sectores emergentes como el Eólico, en el que se enmarca este trabajo, en la producción de piezas de gran tamaño, alto valor añadido y de series cortas o medias, la realización del control de calidad al final de proceso, con las metodologías actuales tales como la Seis-Sigma o el Control Estadístico del Proceso, es insatisfactoria debido al gran impacto económico de producir una pieza defectuosa. Actualmente, a falta de otro procedimiento de control de calidad, las inspecciones se intercalan entre las diferentes etapas de la producción, con el coste económico y en tiempo que supone el movimiento de piezas entre máquinas de mecanizado y medición.



Figura 1. Planetarios para reductoras de molinos de viento.

La nueva metodología que se propone en este trabajo, se aproxima al problema desde dos estrategias de solución diferentes. Por una parte, en la eliminación de defectos que se puedan predecir con el ajuste correcto de las características de proceso (modelización de las

fuerzas y vibraciones) [1,2] y por otra, con el retrabajo en línea de los defectos que gracias a la monitorización del proceso se detecten en máquina.

Los nuevos desarrollos tecnológicos se fundamentarán en el diseño de nuevos equipos de medida y sensores que permitan la monitorización en tiempo real [3] del proceso de corte de material y la posterior integración de estas mediciones en los modelos mecánicos que describen el proceso de mecanizado. De esta forma, simultaneando la fabricación y la verificación, se consigue minimizar el número de piezas con defectos al final de la línea de fabricación, reduciendo costos y tiempos de verificación. De forma indirecta, también es posible medir los parámetros de corte mediante el muestreo de los consumos de los motores eléctricos de ejes y husillo, pero el amortiguamiento que el conjunto de elementos mecánicos y eléctricos intermedios produce en la señal hace que la sensibilidad no sea suficiente para poder discriminar defectos fuera del campo de tolerancia.

Aunque la nueva filosofía de fabricación sea aplicable de forma universal a cualquier procedimiento de arranque de viruta, este trabajo se ha centrado en la operación de mandrinado, proceso de uso extensivo en sectores como el eólico, aeronáutico, químico, etc. en la fabricación de componentes de gran tamaño y elevado coste de fabricación.



Figura 2. Detalle del cabezal D'Andrea montado en el centro de mecanizado de la EUITI de Bilbao.

Debido al alto coste de operación de las grandes máquinas empleadas en la fabricación de planetarios y reductoras para los molinos de viento, el trabajo de validación de la metodología se ha realizado en el taller de ingeniería mecánica de la E.U.I.T.I de Bilbao sobre una fresadora Kondia B700 el cual se ha equipado con un cabezal de mandrinado D'Andrea TA-125.

## 2. METODOLOGÍA DE CONTROL

En la forma tradicional de trabajar, se realiza el programa de mecanizado y se ajustan los parámetros de fabricación después de varias piezas mecanizadas en un proceso de prueba-error. Al final de la línea de fabricación, se realiza el control de calidad y estudian las desviaciones que hubieran podido surgir para corregirlas en las siguientes series. En el caso de la fabricación de componentes para molinos de viento, el control se realiza de la misma forma pero entre las diferentes etapas de fabricación de un único componente, para evitar la propagación de los errores. De esta forma, sigue siendo necesario parar la fabricación para poder hacer la verificación. Estas paradas resultan muy costosas y además, para ciertas verificaciones de precisión es necesario mover la pieza a una máquina de medir por coordenadas, lo cual encarece todavía más el proceso. Aún así, sigue saliendo rentable hacer todas estas verificaciones intermedias para evitar la fabricación de pieza defectuosa.

En la nueva metodología que se propone en este trabajo, la fabricación y el control de calidad se realizan en la misma máquina de mecanizado mientras se está eliminando material. Para ello, se definen dos lazos de control diferentes, el primero aplicado a la deformación de la barra de mandrinar, y que se muestrea mediante una galga

extensiométrica, y el segundo, a la medición de vibraciones, medidas mediante un acelerómetro (mostrados en la figura 3 en amarillo y en marrón respectivamente).

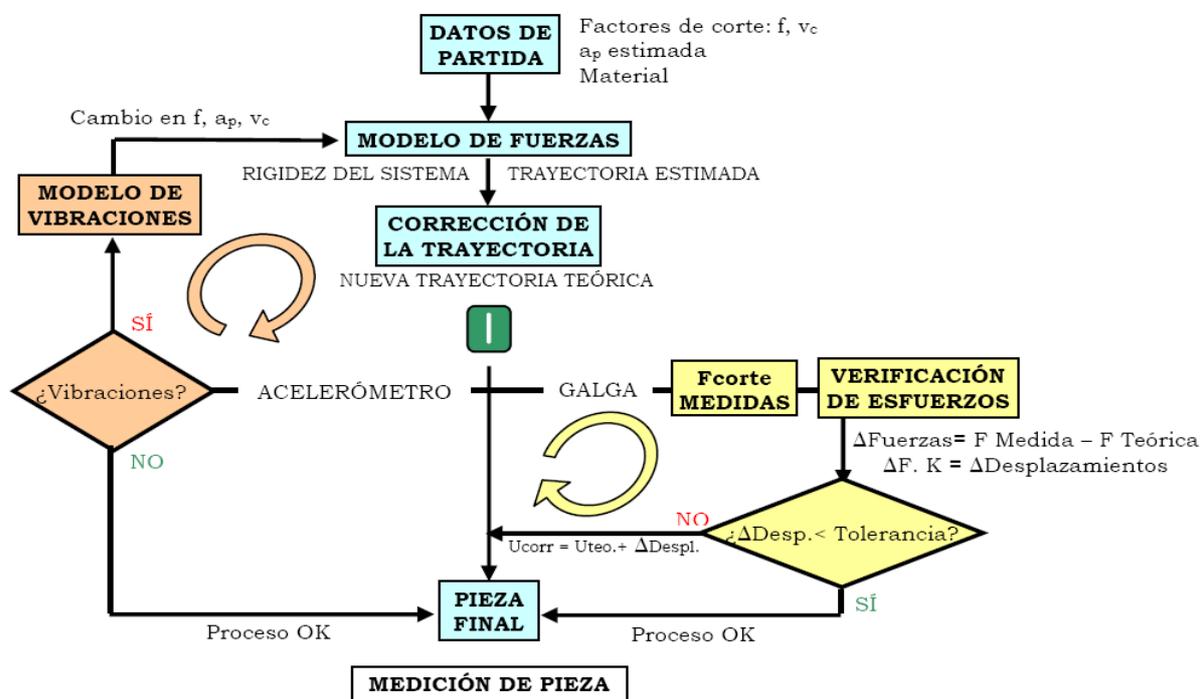


Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología propuesta.

Aunque las rigideces de las máquinas que habitualmente se utilizan en estos procesos son muy altas, las exigencias de fabricación también lo son. Por este motivo, es de gran importancia poder medir las pequeñas deflexiones que producen desplazamientos de la punta de herramienta. Para estas medidas se ha utilizado una galga extensiométrica que previamente se ha calibrado ya montada sobre la barra de mandrinar. La señal de la galga transmite al modelo, las fuerzas de corte en punta de la herramienta, y estas a su vez, se comparan con las teóricas en función de las condiciones de corte previstas. El producto de la diferencia entre fuerzas medidas y teóricas y la rigidez del conjunto, será igual a la deformación y a la diferencia entre trayectorias, que una vez conocida, se corrige en tiempo real.

En cuanto a las vibraciones, las medidas del acelerómetro son analizadas para estudiar las regiones en las que se este produciendo el corte. Si las vibraciones exceden de una medida en la que la calidad superficial se ve afectada, el lazo de control varía las condiciones ( $v_c$ ,  $f$  o  $a_p$ ) para retornar a la condición de mecanizado estable.

### 3. MATERIAL Y MÉTODOS

#### 3.1. Equipamiento experimental

Aparte del centro de mecanizado y cabezal, se han utilizado un analizador de señal OROS OR 35 (Software NVGate), Martillo de impacto modelo 086C03 y Acelerómetros modelo 333B32 para la caracterización de los parámetros modales del cabezal y de los acelerómetros integrados en la herramienta. La calibración estática de la galga frente a las tres fuerzas de corte, se ha realizado con un dinamómetro PCE FG-5K.

El prediseño de la galga y su posicionado en la barra de mandrinar se ha realizado en Unigraphics NX7.5.

### 3.2. Diseño de instrumentación de adquisición y telemetría

El hardware consta del Microcontralador 18LF4620 de bajo consumo de la serie nanowatt de Microchip con memoria RAM interna de 8Kbytes y canales de conversión ADC de 10 bits para la adquisición de las medidas de la galga y del acelerómetro. Posee alta velocidad de procesamiento llegando a realizar ciclos de lectura analógica a una máxima frecuencia de 1 MHz. Comunica con el transceptor de radiofrecuencia CC1100 de TI de muy bajo consumo que tiene una máxima potencia de transmisión de 10dBm y una velocidad máxima de transmisión de datos de 500kBaudios alta velocidad de procesamiento. Para el almacenamiento de datos se dispone de una memoria FLASH con capacidad para 16 Mbit.

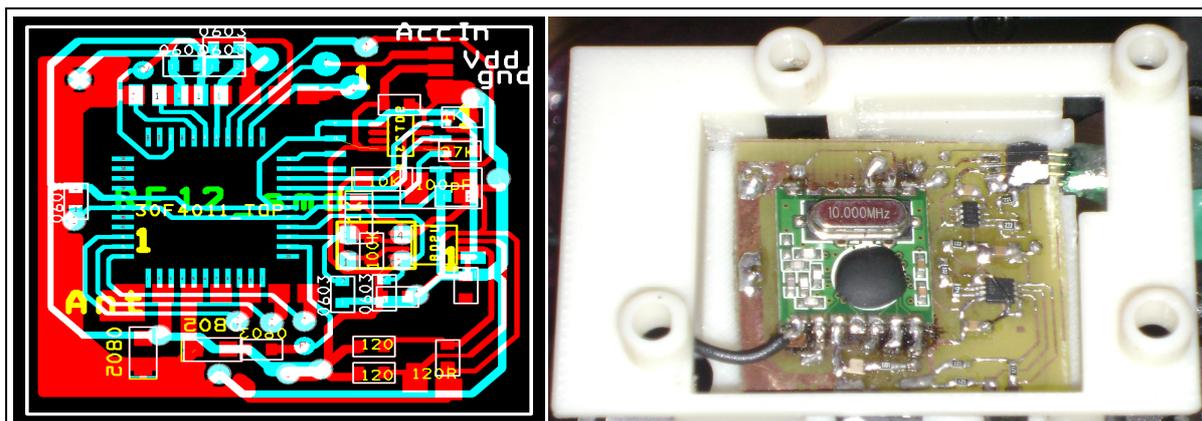


Figura 4. Circuito de adquisición y telemetría con toma para galga y acelerómetro.

La señal procedente de la galga en configuración de puente de Wheatstone se acondiciona mediante el amplificador de instrumentación MAX 4208 y el operacional dual MAX 9916 para las funciones de amplificación y filtrado. El sistema se alimenta con una batería de litio de 3.6V y un regulador LDO para estabilizar el voltaje de salida a 3.3V.

### 4. MODELO ESTÁTICO

Para poder determinar las fuerzas de corte y las deformaciones en la barra de mandrinado [4], se han realizado los ensayos de caracterización de la sensibilidad de la galga extensiométrica frente a las tres fuerzas de corte que intervienen en el proceso de forma independiente.

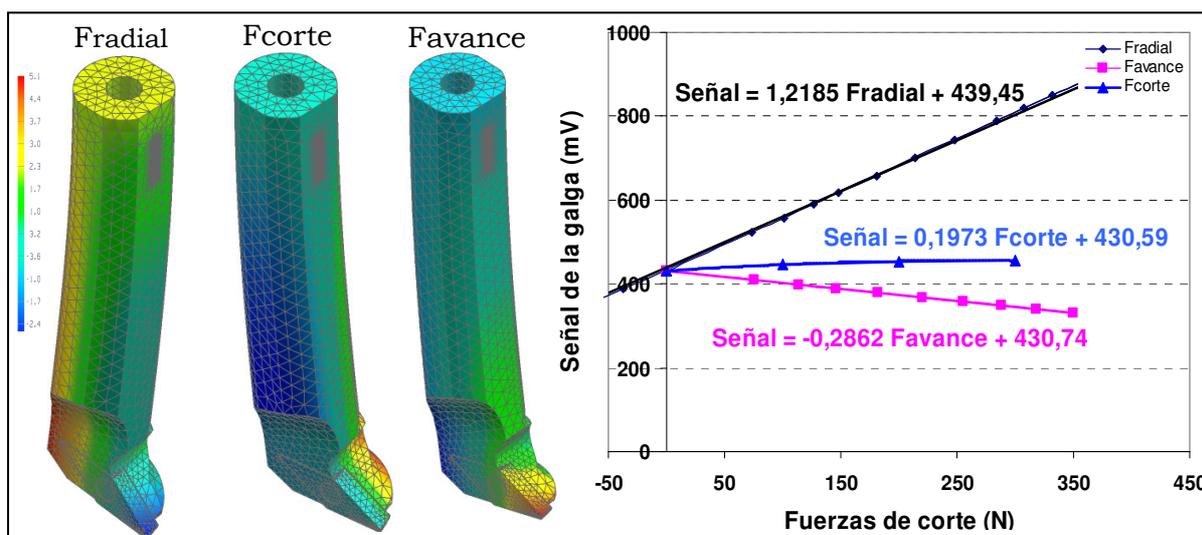


Figura 5. Deformaciones de la barra calculadas mediante MEF. Curvas experimentales de sensibilidad de la galga frente a las tres fuerzas de corte.

La medida en la galga debido a la suma de las tres fuerzas de corte, fuerza radial ( $F_R$ ), de oposición al avance ( $F_A$ ) y de corte ( $F_C$ ), se puede representar mediante la siguiente ecuación, siendo  $S_R$ ,  $S_A$ ,  $S_C'$  y  $S_C$  las sensibilidades de la galga frente a las tres fuerzas y  $G_0$  la ganancia en reposo (valores experimentales  $S_R=1.218$ ,  $S_A=0.286$ ,  $S_C'=0.000398$ ,  $S_C=0.197$ ,  $G_0=430$ ):

$$G = S_R \cdot F_R - S_A \cdot F_A - S_C' \cdot F_C^2 + S_C \cdot F_C + G_0 \quad (1)$$

De la caracterización del material y de las fuerzas de corte, conocemos la relación entre las tres fuerzas de corte, que aproximadamente es constante en la zona de trabajo y de relación  $F_R/F_A = R_{FA}$  y  $F_R/F_C = R_{FC}$  (valores experimentales  $R_{FA}=0,5786$   $R_{FC}=0,3543$ );

$$R_{FA} = \frac{F_R}{F_A} \rightarrow F_A = \frac{F_R}{R_{FA}} \quad R_{FC} = \frac{F_R}{F_C} \rightarrow F_C = \frac{F_R}{R_{FC}} \quad (2)$$

Aplicando la caracterización de fuerzas, la ecuación 1 la podemos simplificar como:

$$G = S_R \cdot F_R - S_A \cdot \frac{F_R}{R_{FA}} - S_C' \cdot \left( \frac{F_R}{R_{FC}} \right)^2 + S_C \cdot \frac{F_R}{R_{FC}} + G_0 \quad (3)$$

Despejando la fuerza radial en función de la señal de la galga tendremos:

$$F_R = \frac{-\left( \frac{S_A}{R_{FA}} - \frac{S_C}{R_{FC}} - S_R \right) \pm \sqrt{\left( \frac{S_A}{R_{FA}} - \frac{S_C}{R_{FC}} - S_R \right)^2 - 4 \cdot \frac{S_C'}{R_{FC}^2} \cdot (G - G_0)}}{2 \cdot \frac{S_C'}{R_{FC}^2}} \quad (4)$$



Figura 6. Caracterización de las fuerzas de corte para el binomio material-herramienta.

Para determinar la deformación en la punta de herramienta debida a las fuerzas de corte medidas con la galga, se utilizará el modelo de deformación [5] representado en la siguiente ecuación:

$$\delta_{PUNTA\ HTA} = \frac{F_R}{0,60e^{-3}} + \frac{q_{Centrif.}}{1,68} + \frac{q_{Centrif.} \cdot 75 + F_R}{4,67} + \frac{(0,5 \cdot q_{Centrif.} + F_R) \cdot 75}{1000 \cdot 0,75} \quad (5)$$

## 5. ESTABILIDAD DINÁMICA

Debido a la baja rigidez dinámica de la barra [6], es determinante a la hora de realizar una operación de mandrinado de calidad evitar la aparición de vibraciones. Las vibraciones en la punta de herramienta producen desde el punto de vista de proceso, el deterioro prematuro

de las herramientas de corte y componentes mecánicos [7] (rodamientos, engranajes, etc.) y desde el punto de vista de pieza final, acabados con mala calidad superficial. Para poder identificar en todo momento la condición de corte estable, se ha instrumentado la barra de mandrinar con un acelerómetro.

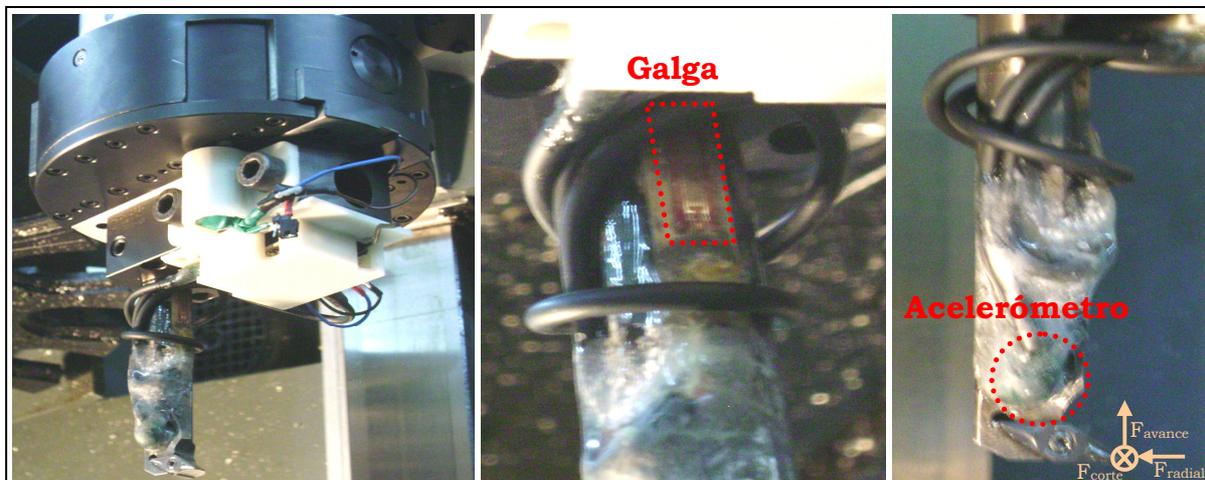


Figura 7. Circuito de adquisición, galga y acelerómetro montados sobre cabezal.

Teniendo en cuenta que el efecto en la calidad superficial producido por las vibraciones en el sentido de la fuerza de corte son despreciables y la alta rigidez del conjunto en el sentido de la fuerza de avance, el acelerómetro se ha situado en el sentido radial en la punta de la barra de mandrinar.

### 5.1. Calibración estática del acelerómetro

La validación del acelerómetro embebido se ha realizado en un útil en voladizo cruzando las medidas experimentales con las de un acelerómetro comercial. Alterando las características modales del útil, se han experimentado diferentes modos en el rango del acelerómetro. Se ha visto que la coherencia de las medidas de ambos acelerómetros es correcta. En la figura 8 se muestra el útil y una señal amortiguada del acelerómetro.

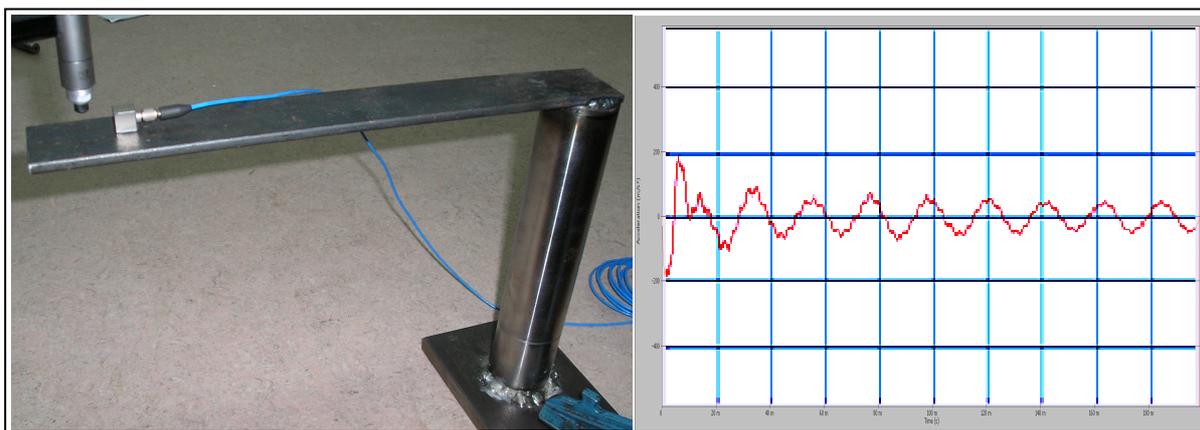


Figura 8. Útil de calibración estática y señal del acelerómetro durante las pruebas.

### 5.2. Calibración centrífuga del acelerómetro

Para poder corregir de forma correcta el Offset debido a la fuerza centrífuga en la señal del acelerómetro se han realizado unos ensayos de rotación en vacío a diferentes radios y velocidades de rotación. Los resultados se muestran en la figura 9. A radios de giro pequeños y bajas vueltas, debido al gran rango del acelerómetro (70g-s) seleccionado para evitar su saturación a altas vueltas debido al Offset centrífugo, la constante de ganancia muestra errores no superiores al 5%. A mayores regimenes de giro el error es despreciable.

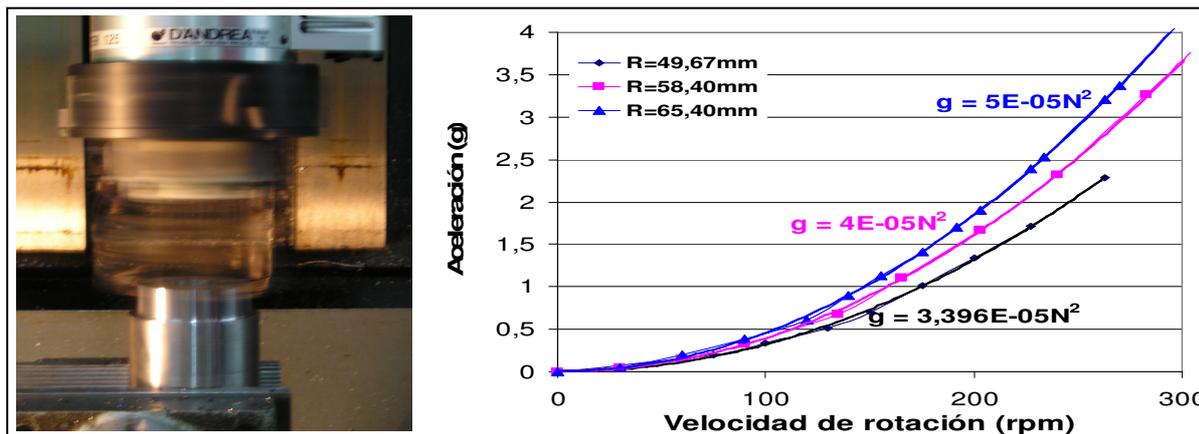


Figura 9. Grafica de la respuesta del acelerómetro frente a la fuerza centrífuga.

### 5.3. Determinación de los modos dominantes del sistema

Se ha realizado una caracterización dinámica de los modos de vibración del cabezal realizando un ensayo con el martillo de impacto para poder discriminar en caso de vibración entre vibraciones forzadas o auto excitadas (Chatter) [8]. La frecuencia dominante de la barra de mandrinar es cercana a 1800Hz y la del cabezal 300Hz aproximadamente. Se determina la necesidad de adquirir a frecuencias superiores a 5KHz para poder representar el primer armónico de la barra.

## 6. RESULTADOS. VALIDACIÓN SOBRE PIEZA

En las pruebas de mecanizado sobre probeta de acero se han medido fuerzas, deformaciones y vibraciones, bajo diferentes condiciones de corte. En la figura 10 se muestra una imagen del cabezal mecanizando a 800rpm con una profundidad de pasada de 0,5mm y la señal de vibraciones adquirida por el acelerómetro. Bajo ciertas condiciones de corte, se han detectado vibraciones, que en el mecanizado han producido superficies con mal acabado. Salvo en condiciones de corte extremadamente severas, la señal de la galga no se ha saturado y ha medido la fuerza radial de forma correcta. Los desplazamientos en punta de herramienta medidos han sido inferiores a 0,06mm.

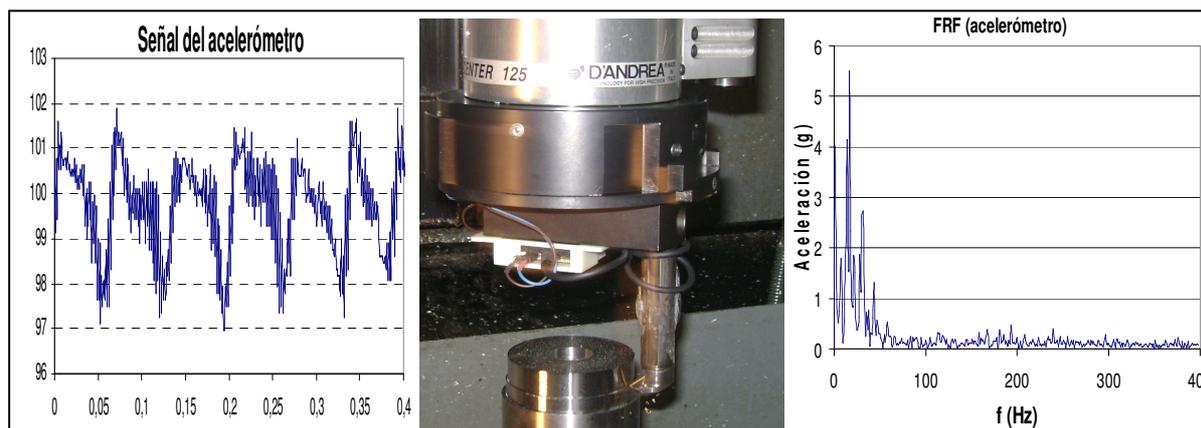


Figura 10. Señal del acelerómetro en condiciones de corte no estables. Modo dominante de la vibración en un armónico de la frecuencia de rotación, vibración forzada.

## 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

De los resultados de los experimentos se puede concluir que es viable monitorizar en línea las fuerzas de corte mediante la utilización de un dispositivo de telemetría. Aunque las medidas de fuerzas realizadas con una sola galga sean correctas, sería de gran interés completar estas medidas con la lectura de una segunda galga puesto que se ve que la

sensibilidad de la barra de mandrinado frente a las fuerza de avance es importante y no siempre es constate la relación entre ambas fuerzas principales. Si se analizan las diferencias entre las fuerzas medidas y teóricas, y su correlación con el error dimensional en la pieza mecanizada, se deduce que el parámetro de control del lazo refleja de forma fiel el fenómeno de deformación del mandrino y su resultado en pieza.

Respecto de las medidas de vibraciones, el acelerómetro ha recogido de forma correcta las vibraciones que se han producido en la barra, y se ha observado, que en los secuencias de vibración de mayor intensidad, como era de esperar, la superficie de la pieza mecanizada ha quedado marcada en forma de pequeñas ondas.

Por todo ello se deduce que el procedimiento aplicado es valido para realizar un control en línea del proceso de mandrinado y como trabajos futuros se plantean, la adición al conjunto y validación de una nueva galga con el objeto de afinar en la medida de la fuerza de avance, la mejora de la adquisición de datos para poder muestrear a frecuencias más altas y el estudio de las vibraciones auto excitadas para la optimización del modelo de vibraciones.

## 8. AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a Aitor Ortiz, Iker Ochoa y Javier Ortiz por la colaboración prestada para la realización de este trabajo.

## 9. REFERENCIAS

- [1] L.N. López de Lacalle, J.A. Sánchez, A. Lamikiz, *High Performance Machining*, Ed. Izaro (2004).
- [2] F.J. Campa, *Metodología para la predicción de la Estabilidad Dinámica en el Mecanizado de Alta Velocidad de suelos delgados*, Tesis Doctoral, Univ. del País Vasco, Bilbao, (2009).
- [3] R. Teti, K. Jemielniak, G. O'Donnell, D. Dornfeld. Advanced monitoring of machining operations, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 59 (2010) 717–739.
- [4] G. Totis, G. Wirtz, M. Sortino, D. Veselovac, E. Kuljanic, F. Klocke. Development of a dynamometer for measuring individual cutting edge forces in face milling , *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24(2010)1844–1857.
- [5] M. Arsuaga, L.N. López de Lacalle, R. Lobato, G. Urbikain, F. Campa, Force and Deformation Model for Error Correction in Boring Operations, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, *Advanced Materials Research* Vol. 498 (2012) pp 121-126
- [6] F. Atabey, I. Lazoglu, Y. Altintas, Mechanics of boring processes—Part I, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 43, Issue 5, April 2003, Pages 463-476.
- [7] Altintas Y., *Manufacturing automation: metal cutting, mechanics, machine tool vibrations, and CNC design.*, Cambridge, UK: Cambridge University Press; 2000.
- [8] E. Budak, E. Ozlu, Analytical Modeling of Chatter Stability in Turning and Boring Operations: A Multi-Dimensional Approach, *Annals of the CIRP* Vol. 56/1/2007