



Monitorización Inteligente de los Procesos de Corte en la Nanoescala

Raúl del Toro Matamoros
Rodolfo Haber Guerra

Junio de 2009

INDICE

1. Resumen	3
2. Introducción.....	3
3. Estudios realizados.	3
3.1 Estudio de los procesos de torneado de alta precisión y nanotorneado	3
3.2 Estudio de los sistemas de monitorización y supervisión del proceso de corte en la micro y nanoescala.....	17
3.3 Estudio de las técnicas de Inteligencia Artificial y su aplicabilidad.	20
3.4 Estudio y evaluación de las técnicas de monitorización red. Plataformas disponibles.	22
3.5 Instalación de sensores de fuerza, aceleración y emisión acústica en un torno de ultra precisión	24
3.6 Adquisición y procesamiento de señales de los sensores instalados y de las señales internas del CNC. Aplicación de técnicas de procesamiento señales digitales.....	27
Conclusiones.....	31
Referencias	32

1. Resumen

En la actualidad una de las claves de los procesos de fabricación es la generación de nuevos conocimientos técnicos y científicos a través del estudio e investigación aplicada del proceso de corte en la micro y nano-escala de aleaciones para aplicaciones aeronáuticas y aeroespaciales y el diseño de un sistema de monitorización inteligente y en red. En este informe se recoge una revisión del estado del arte en los campos y temáticas afines al proceso de corte en la micro y nanoescala, técnicas de inteligencia artificial y monitorización en red de procesos de fabricación. Igualmente se presenta el diseño e implementación de un sistema de monitorización del proceso de corte y la medición de las señales que lo caracterizan.

2. Introducción

En la actualidad una de las claves de los procesos de fabricación es la generación de nuevos conocimientos técnicos y científicos a través del estudio e investigación aplicada del proceso de corte en la micro y nano-escala de aleaciones para aplicaciones aeronáuticas y aeroespaciales y el diseño de un sistema de monitorización inteligente y en red. Entre las cuestiones más importantes que deben ser abordadas están:

- La evaluación de la información sensorial del proceso de nanotorneado y sus perturbaciones.
- El estudio y análisis de la monitorización inteligente y en red del proceso de nanotorneado.
- El estudio y diseño de un sistema de monitorización inteligente y en red de la vibración del cabezal de un torno de ultra alta precisión.
- Estudio y diseño de un sistema de monitorización inteligente y en red de la vibración del cabezal de un torno de ultra alta precisión.
- Estudio y diseño de un sistema de monitorización inteligente y en red de la rugosidad superficial de componentes aeronáuticos especiales.
- Evaluación del desempeño de las estrategias de monitorización desarrolladas y su efectividad.

En este informe se muestran algunos resultados relevantes en este campo.

3. Estudios realizados.

3.1 Estudio de los procesos de torneado de alta precisión y nanotorneado

Las últimas tendencias en el mercado del mecanizado van dirigidas hacia una mayor precisión, el uso de tolerancias más precisas e incluso mejores acabados superficiales en componentes cada vez de menor tamaño, más compactos y con mayores funcionalidades. En consecuencia, esta tendencia está impulsando el resurgir de nuevas tecnologías de mecanizado y diseño de máquinas herramienta como por ejemplo el nano-mecanizado, micromecanizado o el pulido de precisión entre otros. Todo ello trae

aparejado nuevos requisitos para los sistemas de monitorizado con el fin de aumentar la precisión y calidad de los productos, reduciendo los costes de fabricación.

El proceso de nanotorneado es un proceso de mecanizado muy complejo, dependiente de muchos factores que pueden variar su comportamiento en la nanoescala, y que está siendo muy estudiado en E. E. U. U. y Japón, donde se protege y restringe la información por considerarse un campo estratégico.

En Europa existe la necesidad de aplicar dicha técnica de mecanizado, siendo objeto de investigaciones, a nivel de laboratorio y aplicadas, en su mayoría, a materiales de la industria electrónica.

En esta etapa, inicialmente, se estudiaron las tecnologías de fabricación y los procesos de nanotorneado divididos por zonas: América del Norte, Europa y Asia. Haciéndose énfasis en centros de I+D que marcan pautas en esta línea. Por ejemplo, las Universidades de Michigan y British Columbia en EEUU y Canadá, respectivamente, y el IPK en Alemania. Además se estudió la labor que están realizando centros tecnológicos y fundaciones en España tales como Ideko y Tekniker, y universidades como la de Mondragón y la del País Vasco. Además se han tenido en cuenta los estudios realizados dentro del Proyecto Singular Estratégico de MICROMANUFACTURING.

Por otro lado, ME ha estado participando en ferias, jornadas conjuntas con el IAI (CSIC) y eventos de divulgación, etc., teniendo como meta la definición de las especificaciones del sistema y evaluación del mercado y su tendencia.

El área de la nanotecnología ha crecido rápidamente en las últimas décadas en campos tales como el químico, biológico y el de ciencia de los materiales. Desgraciadamente, existe un área de la nanotecnología que no se ha desarrollado tan rápidamente como es el área de la nanofabricación. Aunque los fenómenos como la deslocalización y la crisis financiera, han puesto en el punto de mira a un sector tan importante y sensible para el empleo, el bienestar social y la seguridad de las naciones como el sector de fabricación. Japón, Estados Unidos y la Unión Europea han emprendido una carrera por preservar la tecnología punta de la fabricación y de alto valor añadido.

Gran parte de la actividad investigadora actual está destinada al desarrollo y uso de nanotubos de carbón, a la técnica de la nanolitografía *dip-pen* para circuitos electrónicos, a la manipulación de átomos libres y a la creación de nanopartículas con ADN. Algunas de estas tecnologías tienen ciertas barreras tecnológicas para convertirse en procesos viables para la producción en masa. Sin embargo, hay otra clase de tecnologías de fabricación en la micro y nano-escala basadas en el nano y micromecanizado mecánico que tiene un uso directo en el mercado actual, y cuyo desarrollo e implantación a escala industrial es una necesidad casi primaria.

La nanofabricación es el área de la investigación y el desarrollo que se ocupa de las piezas y productos que tienen características o actúan en la nano-escala. Entendiéndose como estructuras a nano-escala aquellas que poseen al menos dos dimensiones de tamaño no superior a $1 \cdot 10^{-6}$ metros, lo que sería unas 50 veces más pequeño que el espesor de un cabello humano [1].

El término ‘nanotecnología’ fue aplicado por primera vez a la fabricación de productos mediante técnicas de mecanizado, por Nomo Taniguchi en 1974. Éste mostró cómo la tendencia a aumentar la precisión de fabricación estaba llegando al punto en que, en el año 2000, las piezas fabricadas con un mecanizado “normal” tendrían una

precisión de 1 μm , mientras que el mecanizado “de precisión” supondría una precisión de 10 nm y el “ultrapreciso” de hasta 1 nm. Sus predicciones demostraron en muchos casos ser correctas, aunque los métodos de “ultraprecisión” no se hayan implantado aún masivamente.

En Japón se han desarrollado máquinas herramienta para procesos de nanomecanizado. Entre las empresas líderes está *Tokyo Instruments* que comercializa máquinas de nanomecanizado y un microscopio para analizar muestras por debajo de 1 μm . También está *Nexsys* (Rikens) que comercializa sistemas de mecanizado de ultra alta precisión. Dicha tecnología no se comercializa por considerarse estratégica, y por tanto no se tiene acceso a este tipo de máquina herramienta. Centros de investigación y universidades japonesas como *Tohoku University (New Industry Creation Hatcher Center)*, el *Nanotechnology Research Center, Research Institute of Electronic Science*, el *Institute of Physical and Chemical Research* (Riken) lideran los resultados científicos y técnicos en este campo.

En Estados Unidos los *Laboratorios Nacionales de Sandia y Livermore* y varias universidades encabezan la investigación y el desarrollo de nuevos procesos de nanomecanizado y de torneado de muy alta precisión con diamante para acabado nanométrico. Así, el *Precision Engineering Research Laboratory* (PERL) de la *Boston University* reivindican rugosidades nanométricas de $R_q=25\text{\AA}$ utilizando la máquina LODTM, aunque no se aplican a escala industrial.

En Europa varios centros de investigación especializados como Tekniker en España y el IPK en Alemania avanza en la investigación y desarrollo en estos temas, con el fin potenciar el diseño de nuevas máquinas herramientas y perfeccionar los procesos de nanomecanizado y los procesos de torneado de alta precisión nanométrica.

Fabricantes de máquinas herramientas como Kugler y Kern (Alemania), Precitech y Moore Nanotechnology Systems Ltd. (EE.UU) son algunos ejemplos de fabricantes que han logrado precisiones nanométricas en el control de posición y de velocidad de sus máquinas en proceso de corte con profundidad de pasada de una décima de corte.

La fabricación de productos de tamaño o especificaciones micro o nanométricos no sólo precisa de medios de fabricación de ultra-alta precisión, a su vez requiere equipos que midan y posicionen con poco margen de error. La capacidad de controlar la precisión de fabricación hasta estos extremos está proporcionando muchos beneficios, a veces, incluso inesperados. Por ejemplo, se ha demostrado que materiales considerados normalmente quebradizos pueden mecanizarse de forma dúctil si se controla el corte para que tenga una profundidad inferior a un determinado valor crítico (típicamente situado en la zona submicrométrica). Esto supone que el material se elimina en forma de virutas deformadas plásticamente, en lugar de lascas, lo que evita la formación de amplias grietas y daños por debajo de la superficie mecanizada. Esto puede lograrse mediante máquinas desarrolladas para el mecanizado de ultraprecisión.

Cabe citar las aplicaciones de la industria electrónica, los periféricos de ordenadores, la miniaturización de los sensores, las aplicaciones quirúrgicas y biotecnológicas, las precisiones necesitadas en la industria óptica, las telecomunicaciones, la instrumentación científica y la sensorización del automóvil y de los electrodomésticos. La ultraprecisión es un elemento indispensable en la miniaturización.

Tipo de proceso		Mecanizado Convencional		Mecanizado de ultra-precisión	
		Desbaste	Acabado	Desbaste	Acabado
Condiciones de corte	Avance (mm/rev)	0.1 a 1	0.01 a 0.05	0.01 a 0.05	0.005 a 0.001
	Velocidad del husillo (r/min)	100 a 300	200 a 300	1000 a 2000	2000 a 3000
	Profundidad de corte	0.1mm-1mm	0.01mm-0.1mm	10µm-50µm	1µm-5µm
	Herramienta	1. De HSS 2. De Carburo 3. De Cerámica 4. De Diamante industrial		1. Herramienta de diamante monocristalino 2. De diamante industrial	
Parámetro	Rugosidad	10µm-100µm	1µm-10µm	20nm-30nm	10nm
Calidad	Precisión de forma	1mm-0.5mm	10µm-50µm	1µm-2µm	0.3µm-0.5µm

Fig. 1. Comparación entre el mecanizado convencional y de precisión

Por un lado, existen las tecnologías de fabricación derivadas de procesos de micromecanizado que van aumentando su precisión. Ejemplos de estos procesos son los microfresados, microtaladrados, micropunzonado, microelectroerosión por hilo y por penetración, micromecanizado por láser, microconformado, microinyección, y por supuesto, el nanotorneado.

Se habla de microtecnologías cuando las dimensiones están comprendidas entre 0,5-499 µm en al menos dos de las tres dimensiones, y de nanotecnologías, cuando las dimensiones están comprendidas entre 0,5-499 nm en al menos dos de las tres dimensiones.

Este conjunto de tecnologías se van uniendo a las tecnologías derivadas de la fabricación de productos microelectrónicas, con la familia de procesos de fabricación que actúan sobre obleas de silicio u otros materiales mediante procedimientos de poner y quitar capas finas, como la deposición de capas en fase vapor (PVD y CVD), ataque químico, ataque seco, fotolitografía, microestereolitografía, procedimiento LIGA, etc.

El conjunto de ambas líneas converge y se complementa, normalmente cuando se fabrican microproductos o microcomponentes hacen falta aplicar distintas tecnologías de fabricación para llegar al producto final (Ver Figura 2) [2].

Se ha previsto que el mercado para este tipo de productos tenga un crecimiento anual del 20% [3] y se espera, por ejemplo, que en algunos campos como el del automóvil, afecte a nuevos materiales, a la información *a bordo*, a sistemas de visión nocturna, a todo tipo de sistemas de células de energía, a recubrimientos y a los sistemas de iluminación [4].

El gran acabado superficial y la exactitud en la forma alcanzada por un torno de ultra alta precisión hacen que este tipo de tecnología de mecanizado se esté adaptando a la fabricación de una gran variedad de productos optoelectrónicos, como láseres de larga vida en servicio, y se esté investigando para aplicarlo, por ejemplo, a discos magnéticos para aumentar su capacidad de almacenamiento de datos.

Microtecnologías

MICROSISTEMAS:	MICROMÁQUINAS:
<ul style="list-style-type: none"> • Micromecanizado en volumen (silicio). • Micromecanizado en superficie (silicio). • Electrodeposición. • Encapsulado e interconexión. • Ataque químico. • Ataque seco. • Fotolitografía. • LIGA. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ingeniería de precisión. • Micromecanizado mecánico. • Micromecanizado láser. • Micromecanizado EDM. • Replicación (microinyección y hot embossing). • Microensamblado. • Microrobots.

Fig.2. Tabla resumen de las microtecnologías (Fuente: Tecniker)

El proceso de nanotorneado o torneado con diamante es un proceso de mecanizado de alta precisión llevado a cabo con tornos con Control Numérico asistido por ordenador (CNC), que tienen una punta de diamante monocristalino como herramienta de corte. Este proceso también es conocido como *Single Point Diamond Turning* (SPDT), por el contacto en un “único punto” (en términos macroscópicos) que la herramienta monocristalina hace sobre la pieza a mecanizar. El proceso de mecanizado se basa en los mismos principios que el torneado convencional.

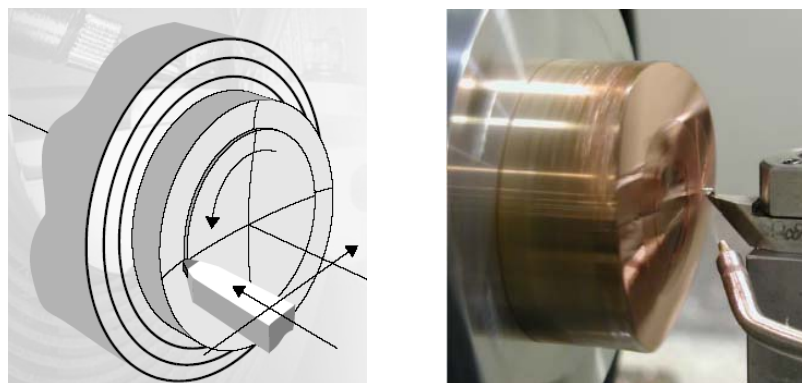


Fig.4. Operación típica de SPDT: $\Omega=2000$ r.p.m., $d=4\mu\text{m}$, $f=100$ mm/min.

Los movimientos que tiene un torno de ultra alta precisión para acabados nanométricos aparecen representados en las figuras 4 y 5. El proceso de micro y nanotorneado comprende varias etapas que hay que tener en cuenta y que son importantes. Inicialmente, las primeras etapas del mecanizado se llevan a cabo usando tornos con CNC de alta precisión, para ir ajustándose cada vez más a las dimensiones deseadas de la pieza (se sobredimensiona unos 0.3-0.5 mm). La punta de diamante se usa en las etapas finales del torneado para obtener acabados superficiales a niveles submicrométricos y subnanométricos. Los acabados superficiales se miden a través de la distancia de valle a pico de las ondulaciones y marcas hechas por el torno. Los errores de forma se miden por medio de la desviación media de la forma ideal teórica.

Tanto los errores de forma como el acabado superficial deben ser medidos y monitorizados durante todo el proceso, para asegurar la precisión en el mecanizado,

usando un sistema de control de desviaciones en la propia máquina, equipos de contacto, de no contacto como perfilómetros e interferómetros láser, o técnicas microscópicas como la óptica y la electrónica. Teniendo siempre en cuenta, que tanto la máquina-herramienta, como los aparatos de medida, son instrumentos muy sensibles a las vibraciones, temperaturas y humedad, y requieren una localización e implantación adecuada dentro de las instalaciones industriales.

Por tanto, se podría decir que el sistema de nanotorneado asienta sus bases sobre la metrología, la precisión y el control. La interferometría láser combinada con la amortiguación con fluidos hidrostáticos facilita la precisión en los desplazamientos lineales, sin movimientos relativos y con fricciones mínimas para el acabado superficial [5]. Los transformadores diferenciales de variable lineal (LVDT) y otros sensores de calibración, permiten la precisión en el posicionamiento de la herramienta. La suspensión neumática es necesaria para aumentar la velocidad rotacional en la pieza y controlar las tolerancias cilíndricas y la alineación. Un sistema de control de vibraciones minimiza el impacto de las vibraciones medioambientales que pueden afectar a la calidad de la pieza.

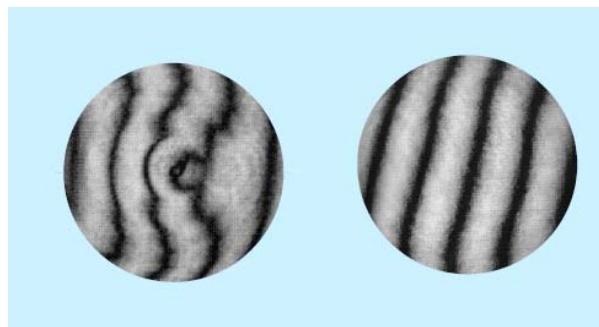


Fig.6. Los efectos de fuerzas presentes durante el mecanizado, como la centrífuga, hace que se produzcan errores de forma y peores acabados superficiales, que deben ser corregidos por la máquina. En la imagen, realizada con un interferómetro de Fizeau, se pueden ver los resultados sin y con correcciones hechas por la propia máquina-herramienta (Precitech)

La herramienta de corte es movida con precisión nanométrica mediante la combinación de un motor eléctrico con accionamientos piezoeléctricos. El movimiento de la herramienta está controlado por una lista de coordenadas generadas directamente por ordenador desde el modelo CAD. La superficie final es el resultado de sucesivas pasadas de corte de profundidad cada vez menor.

El diamante es una herramienta especial de corte y de muy altas prestaciones, debido a su elevada dureza (capaz de deformar cualquier otro material), rigidez (soporta elevadas fuerzas de mecanizado deformándose poco), conductividad térmica (que hace que la viruta no se pegue en la herramienta y el calor de fricción se disipe mejor), baja fricción (en aire) y relativa estabilidad química. Esta estabilidad química del diamante cesa cuando el material a trabajar tiene afinidad por el carbono, y lo absorbe, por lo que el nanotorneado no es aplicable a ellos, o al menos en condiciones normales (en condiciones criogénicas es posible disminuir el coeficiente de difusión del carbono de la herramienta al material a mecanizar, lo que haría posible el mecanizado por diamante de ciertos elementos y materiales). En la figura 7 se resumen estos materiales.

Como norma general, se podría decir que los elementos con electrones no emparejados en la capa d no son susceptibles de ser mecanizados con diamante en condiciones normales, mientras los elementos que los tienen en número par en dicha capa, sí lo son [6].

Elementos no mecanizables	Elementos mecanizables
Uranio, Manganese, Niquel, Cobalto	Indio, Plomo, Zinc y Estaño
Acero, Titanio, Cromo, Vanadio	Plutonio, Magnesio, Aluminio , Germanio
Rodio, Rutenio, Niobio, Molibdeno	Plata, Oro, Cobre y Berilio
Tántalo, Renio y Wolframio	Silicio

Fig.7. Elementos mecanizables y no mecanizables con diamante en condiciones normales

El diamante utilizado para mecanizar puede ser de tres tipos diferentes. El cristal de diamante natural es relativamente caro, los cristales tienen orientaciones múltiples e impurezas, lo que da distintos resultados en el mecanizado. De todos modos, es el más usado para mecanizado de precisión con los materiales compatibles (Ver figura 8).

El diamante policristalino consiste en pequeñas partículas de diamante (del orden de micrómetros) que se mezclan con un aglomerante de base de cobalto, normalmente, y luego se sinteriza (formando el cermet) bajo la forma de la herramienta de corte. Este tipo de diamante no es utilizado para aplicaciones ópticas, ni para el proceso de SPDT porque la eliminación de material es mayormente por abrasión o pulido y no por arranque de viruta.

Los diamantes sintéticos se usan cuando el control de las impurezas es importante. Se sabe que las impurezas en un diamante natural están asociadas a las variaciones en el material arrancado por unidad de tiempo por parte de la herramienta de corte. Los diamantes sintéticos son más fáciles de controlar y más predecibles, pero mucho más caros que los naturales.

Por tanto, en el nanotorneado se usarán puntas de diamante natural monocristalino, por norma general, o sintéticos para aplicaciones más específicas, donde se requieren pocas impurezas. Hay que tener en cuenta la gran fragilidad del diamante, que puede dar lugar a una rotura catastrófica de la herramienta de corte en caso de un impacto antes, durante o después del mecanizado, por un avance excesivo en la entrada o salida, por cambios bruscos de secciones, etc.



Fig.8. Herramientas de diamante.

Parameter	Nose radius	Rake Angle	Clearance Angle	Edge radius
Typical Value	0.1-3 mm	0-30° (negativos)	3-10°	50-1000 nm

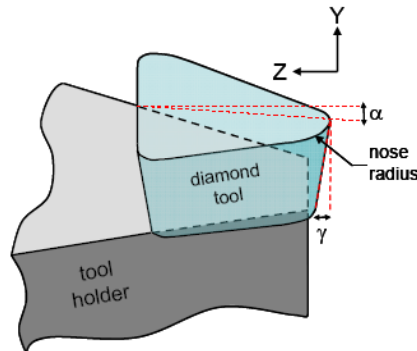


Fig. 9. Valores típicos de los parámetros para el SPDT

En la figura 9 se describen los parámetros de corte típicos.

Al ser el nanotorneado mecánico un proceso de varias etapas, donde las primeras etapas se hacen con tornos de precisión con CNC y herramientas, normalmente, de carburo de wolframio (semicompatible con el diamante), conviene que la pieza se limpie de posibles impurezas, dejadas por la herramienta en la etapa anterior, antes de pasar a la etapa de SPDT.

Los principales factores que afectan al acabado superficial de la pieza mecanizada por SPDT son: la geometría de la pieza, las vibraciones, las propiedades del material y la calidad y características de la herramienta de corte. La geometría de la pieza es un factor determinante, de forma que cuanto más convexidad tiene la pieza, más complicado es acceder a su superficie con la herramienta. También determinará el modo de fijación de la pieza, parte ya muy conflictiva en el mecanizado convencional.

En el SPDT, la rugosidad superficial es extremadamente baja debido a la fidelidad en la reproducción del perfil del filo de corte de la herramienta, por eso la forma de la punta de diamante es un factor importante, dado que su diseño influirá en la interacción con la pieza y en el resultado final.

Muchos aspectos del SPDT se pueden representar mediante el modelo de corte ortogonal mostrado en la Fig.10, pero el perfil teórico superficial de la pieza acabada, está muy ligada, como ya se ha mencionado, a la geometría completa del filo de corte de la herramienta, incluyendo el radio de la punta.

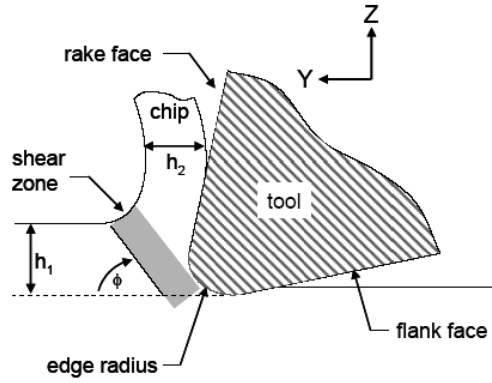


Fig. 10. Diagrama del mecanismo de corte del SPDT

En condiciones ideales, la herramienta de diamante sigue una trayectoria conocida y bien determinada a lo largo de la periferia de la pieza, marcada por la profundidad de corte d , la velocidad de avance f , y la velocidad del husillo ω . La rugosidad teórica R_a viene determinada por estos parámetros y el radio de la punta de la herramienta, r_n , según la ecuación (1).

$$R_a = r_n - \sqrt{r_n^2 - f^2} \quad (1)$$

También, usando un modelo de la aproximación parabólica, se puede obtener la rugosidad de pico a valle (PV), a través de la fórmula (2) [7]:

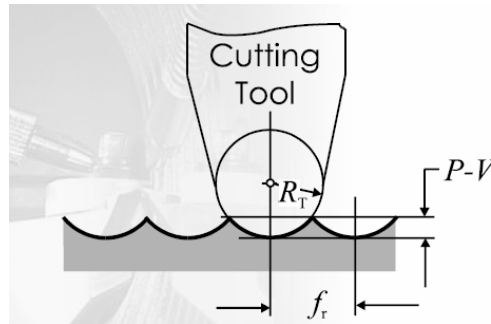


Fig.11. Rugosidad pico-valle con la aproximación parabólica

$$PV = \frac{f_r^2}{8R_T} \quad (2)$$

donde f_r es el avance perpendicular a la dirección de movimiento de la punta y R_T es el radio de la punta de diamante.

Sin embargo, en la práctica, la profundidad de corte d está constantemente cambiando debido a la vibración relativa entre la herramienta y la pieza, así como por los errores en el posicionamiento y en las guías de la herramienta. Esta variación en el posicionamiento de la herramienta, δ , crea variaciones instantáneas en el área de las virutas, A , que es directamente proporcional a la fuerza de corte instantánea, tal y como se refleja en la ecuación (3) y se esquematiza en la Fig. 12. [8].

$$A = df + \delta\sqrt{2df} \quad (3)$$

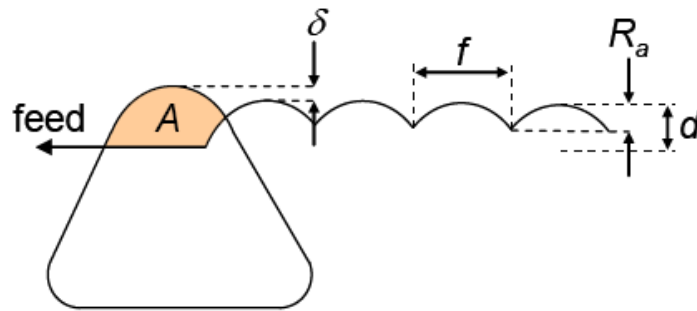


Fig.12. Sección transversal del perfil superficial previsto

Se puede mejorar esta rugosidad, mediante varias pasadas de corte como se esquematiza en la Fig.13. La profundidad de corte es normalmente, menor que el tamaño de grano medio de un agregado policristalino.

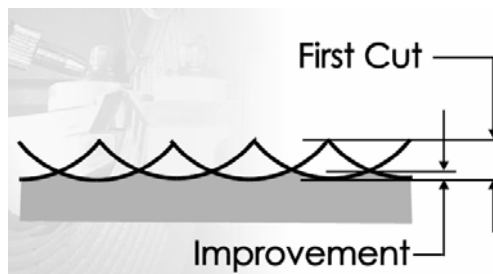


Fig.13. Mayor calidad superficial mediante varias pasadas de corte.

En resumen, la calidad de la superficie obtenida en torneado con diamante está muy influenciado por la interacción entre la herramienta y la pieza a mecanizar. Esta interacción influye en las fuerzas de corte, en el fenómeno de formación de la viruta y depende de la microestructura de la pieza a mecanizar, entre otras cosas. Los cambios locales en la profundidad del corte y las propiedades del material (bordes de grano, orientación de los granos, etc.) varían las fuerzas de corte, lo cual puede originar errores de forma inaceptables.

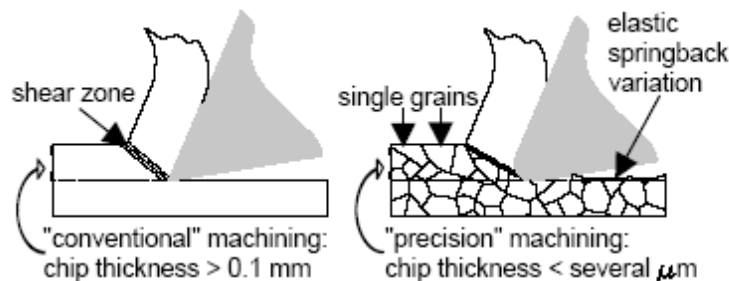


Fig.14. Comparación entre el proceso convencional y el de corte de ultraprecisión.

La geometría de la herramienta está muy controlada, de forma que el radio de la punta esté comprendido entre 3-75 nm, el ángulo de incidencia esté próximo a 0° (5° para plásticos) y el de desprendimiento sea similar a las herramientas convencionales

(6-10°) [9]. Esto supone un alto coste en comparación con las herramientas convencionales. Son numerosos los estudios que se están haciendo en este campo. (Ver figuras 14, 15 y 16).

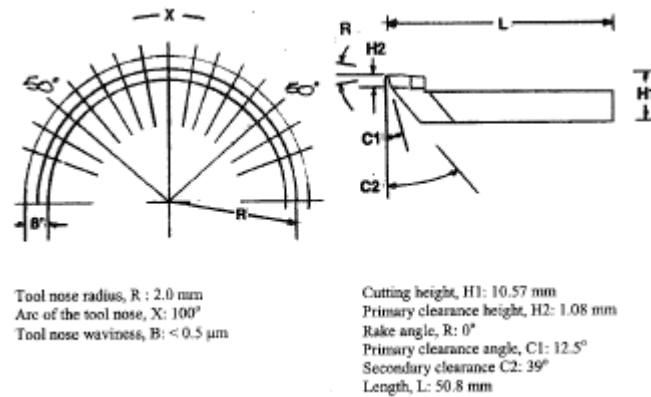


Fig.15.Geometría típica de una herramienta de cristal monocristalino

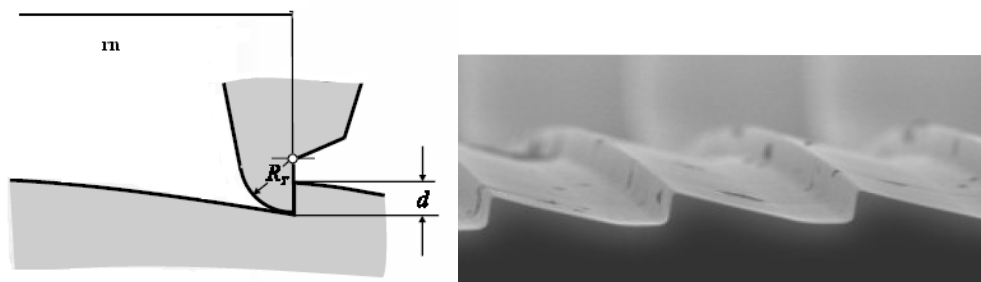


Fig.16.Ejemplo de herramienta semicircular y ejemplo de acabado obtenido en un molde de níquel con una herramienta de $5\mu\text{m}$ de radio y una profundidad de $4\mu\text{m}$.

La lubricación, refrigeración y la eliminación de la viruta desempeña también un papel decisivo en el mecanizado de alta precisión, normalmente se utiliza una mezcla de aceite-aire en forma de niebla (*mist*) que se proyecta sobre la punta de la herramienta para refrigerar y lubricar, mientras que para evacuar las virutas se disponen unas boquillas de aire, que deben estar correctamente orientadas para no afectar ni empeorar el acabado superficial.

En el mecanizado de ultra alta precisión la viruta puede medir menos de una micra. A esas escalas, el acabado superficial y la formación de virutas se ven mucho más afectadas por las propiedades del material a mecanizar (ductilidad o características microtopográficas). De ahí, que cuando se corta material policristalino en presencia de viruta no deformada de muy pequeño espesor, el mecanismo de arranque de material puede verse muy influido por los granos de éste y su orientación. En las Universidades de San Paulo y de Berkeley, se han comenzado a investigar estas interacciones a partir de modelos gráficos de las emisiones acústicas generadas en el proceso de mecanizado [10].

El torneado con diamante puede dar lugar a dos tipos de defectos superficiales:

1. Defectos microscópicos.

Algunas propiedades del material, como la dureza, la heterogeneidad o las impurezas (especialmente en metales y sus aleaciones), pueden dar lugar a un mayor número de defectos superficiales. La dureza y ductilidad aumentan el desgaste de la herramienta. Las impurezas suelen ser residuos del proceso pirometalúrgico o afino de los metales y aleaciones. Las impurezas de silicio, por ejemplo, en una superficie pulida de aluminio, originan unas marcas en forma de lágrima, según pasa la punta de diamante. Estas lágrimas, pueden ser irrelevantes para aplicaciones ópticas en la ventana del IR, pero para aplicaciones en el visible o para láseres de alta potencia, estos defectos pueden tomar un valor significativo. Este tipo de defectos, además, tienen el inconveniente de ser difíciles de localizar, incluso con la más avanzada microscopia (ver figura 17).

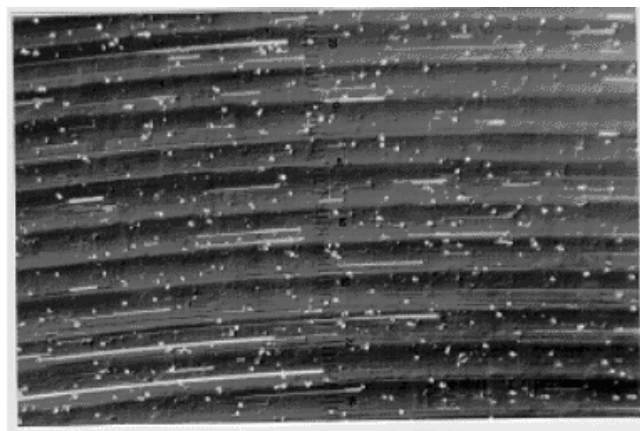


Fig.17. Impurezas de Si que deterioran el acabado superficial de la aleación de Al 7075 T6

La estructura del material también suele ser un factor problemático, que ocurre cuando la estructura de grano es pronunciada, afecta a las aleaciones de Al, de Cu y a materiales como ZnS y ZnSe, y suele ocurrir cuando el husillo está desequilibrado o cuando la herramienta vibra con respecto a la pieza (a esto se le llama *chatter*), tal y como se muestra en las figuras 18 y 19.

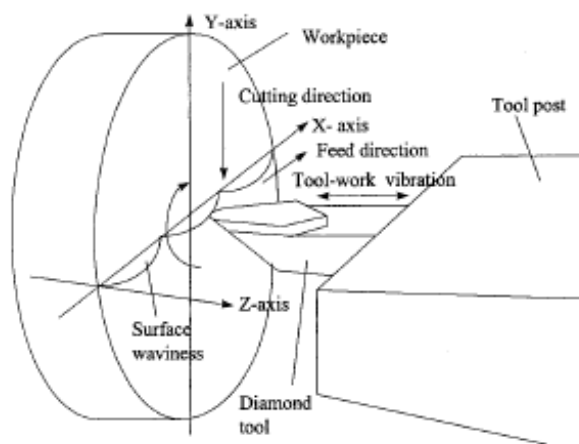


Fig.18. Ondulación superficial inducida por la vibración entre herramienta y pieza (Chatter)

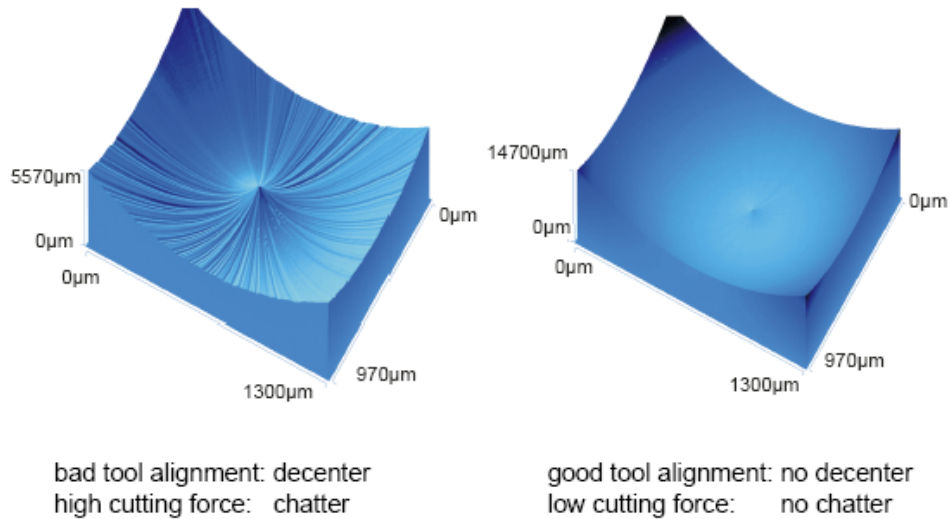


Fig.19.Ejemplos del acabado superficial debido al *Chatter*.

2. Defectos macroscópicos (errores de forma o geométricos).

Estos son el resultado de las tensiones residuales y los bordes de grano del material.

Las tensiones residuales son las resultantes del mecanizado o tratamiento térmico previo del material, y pueden hacer que el material se curve, o se agriete. Estas tensiones también dependen de la forma de la pieza, y de cómo se laminó o conformó. Lo ideal es someter a la pieza a un tratamiento para aliviar las tensiones residuales antes del proceso. Las placas deben ser evitadas, pues, incluso con el tratamiento para eliminar las tensiones residuales previo a la mecanización con torno de diamante, no se eliminan los efectos de su estructura laminada.

Los bordes de grano o de los cristales también pueden afectar a la forma de la pieza e incluso romper la punta de diamante, al generar “escalones” demasiado grandes entre ellos. Estos efectos son particularmente evidentes cuando se mecaniza germanio policristalino y silicio policristalino, lo ideal sería mecanizar piezas monocristalinas de germanio o silicio. Estos efectos también se pueden observar en ciertas aleaciones especiales de cobre.

Los materiales policristalinos son considerados isotrópicos, continuos y homogéneos en el mecanizado convencional pero en el SPDT se consideran los cristales con sus orientaciones aleatorias y sus propiedades anisótropas. Este efecto sobre el acabado superficial está siendo estudiado en el acabado superficial de monocristales, Lee, To y Cheung [11], propusieron la siguiente relación (4) para estimar el grado de rugosidad anisótropa (DRA) para un material determinado:

$$DRA = \frac{\sigma_{Ra}}{Ra} = \frac{m \sqrt{\sum_{i=1}^m R_{a,i} - \overline{R_a}}}{\sum_{i=1}^m R_{a,i} \sqrt{m-1}} \quad (4)$$

donde $\overline{R_a}$ y σ_{Ra} son la desviación media y estándar de la superficie en todas las m secciones radiales de la parte torneada. $R_{a,i}$ es el valor aritmético de la rugosidad en su sección i -ésima.

Un mayor valor de DRA denota mayor comportamiento anisótropo (como puede ser el caso del vidrio, que es amorfo), mientras que un bajo índice DRA indica gran homogeneidad de las propiedades o isotropía (como podría ser el caso de la silicona).

La Fig. 20 muestra los dibujos de la rugosidad superficial para tres orientaciones cristalográficas distintas de un monocristal de cobre, y la tabla de la Fig.21, muestra los valores DRA para cada orientación. Siendo la orientación (110) la más anisótropa.

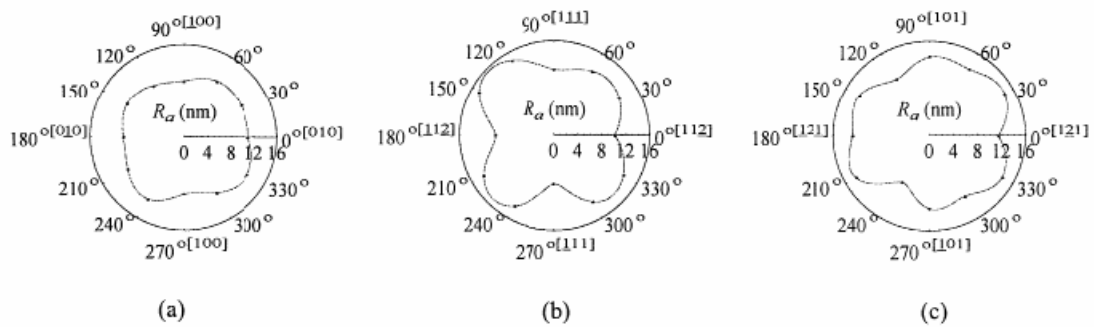


Fig.20. Gráficas de la rugosidad superficial para el cristal de cobre con los planos de corte a) (001), b) (110) y c) (111)

Orientation	Range, R_a [nm]	$\overline{R_a}$ [nm]	DRA
(001)	9.75 – 12.55	10.97	0.075
(110)	8.15 – 14.65	12.13	0.167
(111)	9.05 – 14.35	12.44	0.120

Fig.21. Características de la rugosidad superficial para las distintas orientaciones cristalográficas

En las siguientes figuras (figura 22 y 23) se muestran los efectos producidos por las variaciones cristalográficas en materiales policristalinos.

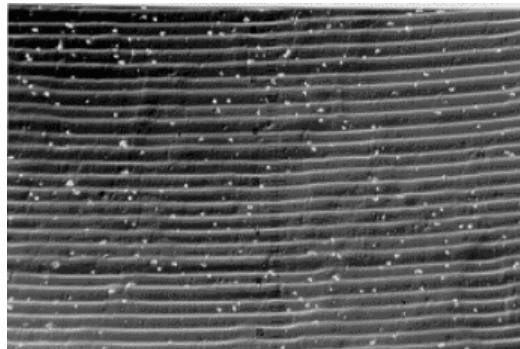


Fig.22. Ondas producidas durante el SPDT debido a la variación en la orientación de los cristales de la aleación de Al 2011 (200X)

En la figura 23 se muestran las ondulaciones dejadas por la punta de diamante en un material policristalino (aleación de aluminio 6061 T6), debido a los bordes de grano y a la orientación de éstos, y también un esquema de cómo actuaría la punta de diamante sobre un único cristal [12]:

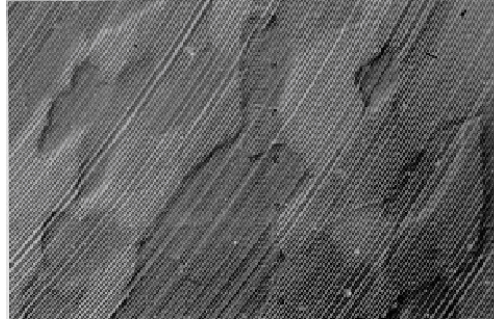


Fig.23. Aleación de Al 6061 T6 (100X)

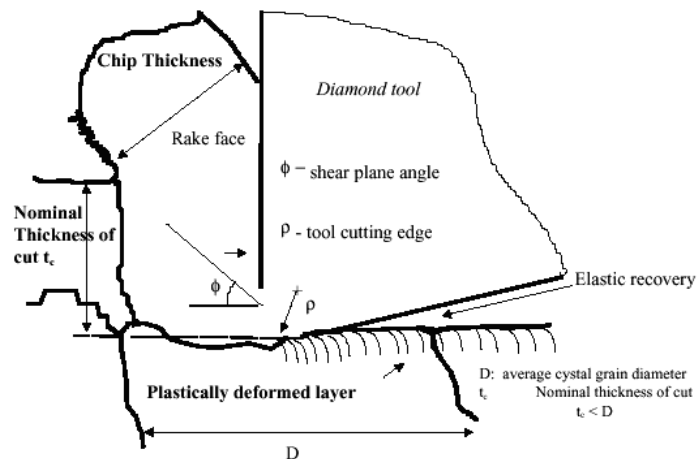


Fig.24. Esquema del mecanismo de corte en un único cristal

La elección de las condiciones de corte también afecta el acabado superficial de la pieza. En el mecanizado de ultraprecisión, las condiciones de corte suelen ser, avance entre 5-15 $\mu\text{m}/\text{rev}$ y profundidad de corte entre 1-10 μm [13]. Este orden de magnitudes implica, como ya se ha mencionado antes, que el arranque de material y el proceso de generación de la superficie estén gobernados por micro interacciones entre el elemento de corte de diamante y la pieza [14].

3.2 Estudio de los sistemas de monitorización y supervisión del proceso de corte en la micro y nanoescala.

En el estudio se incluyeron todos los aspectos relacionados con la investigación de sensores para el proceso de nanotorneado, incluidos básicamente los de emisión acústica, acelerómetros y basados en láser y las estrategias de pre-procesamiento de señales (filtrado analógico), incluyendo criterios industriales tales como la robustez, el

coste, velocidad de respuesta y otros criterios de tipo académico tales como nuevos sensores en fase de desarrollo [15].

La tecnología de los sensores ha evolucionado siendo inicialmente una simple herramienta de diagnóstico para el mecanizado hasta llegar a ser un componente integral con sistemas inteligentes de toma de decisión. En el periodo 1950-1980, un amplio rango de sensores (termopares, acelerómetros, galgas extensiométricos o sensores de emisión acústica) fueron empleados para monitorizar determinados parámetros característicos, especialmente el desgaste de la herramienta, las fuerzas de corte y las vibraciones y roturas de herramienta. A principios de los 90, gracias al avance de las técnicas de procesamiento de señal y las investigaciones sobre inteligencia artificial se desarrollaron nuevas aplicaciones para los TCMS (*Tool condition Monitoring*). Actualmente, se está produciendo una tendencia de integración de los sensores empleados en el desarrollo de los TCMS [16-17]. Estas soluciones permiten monitorizar con mayor eficiencia entre otros el proceso de microfresado y el nanotorneado.

Los métodos de detección de rotura de herramienta que existen a día de hoy se pueden clasificar en dos grupos bien diferenciados; los métodos directos y los indirectos. Los métodos directos se basan en la sensorización óptica mientras que los indirectos monitorizan las condiciones de herramienta por medio de parámetros asociados. La limitación en cuanto a accesibilidad del área de mecanizado conlleva una mayor predilección por los métodos indirectos tales como medición de fuerzas de corte, emisiones acústicas, vibración de la pieza/herramienta o variación de la intensidad del motor.

Los TCMS existentes a día de hoy para los procesos de micromecanizado y nanomecanizado presentan unos ratios coste/funcionalidad muy elevados y son mayoritariamente aplicables en un rango de condiciones de corte muy limitados [18-19]. Por ello, se requieren soluciones fiables y económicamente ajustadas con el fin de obtener un mejor empleo de las máquinas y herramientas de corte empleadas, y en consecuencia, mejorar la calidad de los componentes fabricados.

En general, se puede decir que existen cinco parámetros externos que pueden medir en tiempo real: posición, fuerza, temperatura, aceleración y emisión acústica [20]. De esta relación, las dos últimas están asociadas a fenómenos de vibración, aunque en la práctica, los sensores se diferencian en la respuesta frecuencial y la localización de la zona de deformación en el material [21-22]. La figura 25 es una representación gráfica de la aplicación de varios sensores de acuerdo con la precisión requerida. Sólo los dinamómetros, acelerómetros, interferómetros láser y sensores de emisión acústica son útiles para la nanofabricación [23-24].

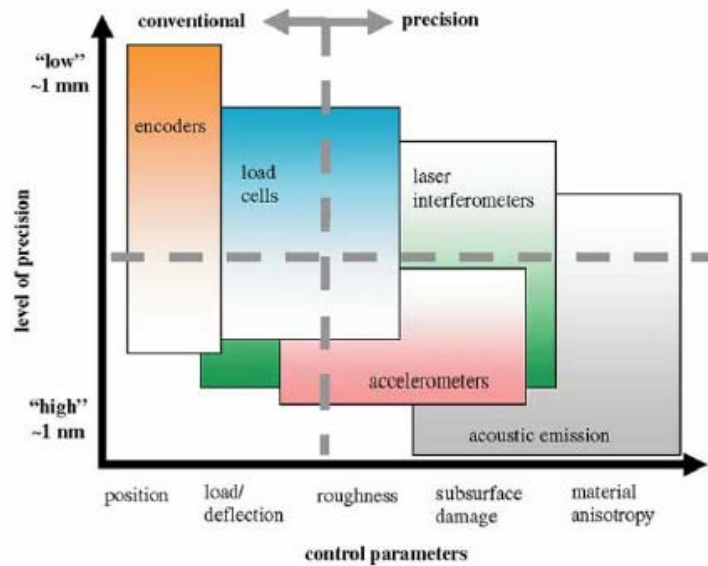


Fig. 25 Características de varios sensores y sus niveles de precisión [19].

Las fuerzas en el nanomecanizado pueden ser medidas por un dinamómetro de sub-milnewton, como puede ser, por ejemplo, el modelo Kistler 6256 MiniDyn, capaces de medir simultáneamente la fuerza en las tres dimensiones con un ancho de banda típico de unos 10kHz. En el corte a escala nanométrica, la fuerza está muy relacionada con el proceso de formación de virutas, así como con la geometría de la herramienta y los parámetros de corte. Drescher y Dow [26] llevaron a cabo los primeros ensayos sobre las fuerzas del nanotorneado, observando que pequeños cambios en la geometría de la herramienta afectaban de modo considerable a las fuerzas de corte y daban lugar a tensiones en la pieza como resultado de las elevadas fuerzas, mayores que las que fueron predichas en el análisis de dureza de la pieza y en el modelo analítico de los mecanismos de corte.

Otras investigaciones más recientes se han centrado en la relación entre el corte, las fuerzas inducidas y la rugosidad superficial, ángulo de corte, morfología de la viruta y la energía de fricción [27]. Los resultados indican que las fuerzas son aproximadamente lineales en respuesta a la carga de viruta, mientras que la profundidad de corte está por encima de el radio del filo de la herramienta. Por debajo de este nivel, las fuerzas se vuelven no lineales.

Los acelerómetros son bastante usados en los experimentos de nanotorneado, aunque los desequilibrados en el husillo y en los accionamientos de desplazamientos lineales juegan un papel muy importante en la generación de vibraciones, que influyen sobre el acabado superficial y sobre la vida de la herramienta [28].

Desde que se sabe que las vibraciones afectan al acabado superficial y a las tolerancias de las piezas nanotorneadas, la emisión acústica (AE) proveniente del proceso de eliminación del material es un parámetro lógico a monitorizar. En micropulido, la profundidad de corte a la que se da la transición de eliminación de material de dúctil a frágil, puede ser bien detectada usando la emisión acústica [29]. La emisión acústica también es útil para monitorizar la energía específica de corte, que está íntimamente relacionada con el modelo analítico de disipación de la energía en las zonas de corte [30].

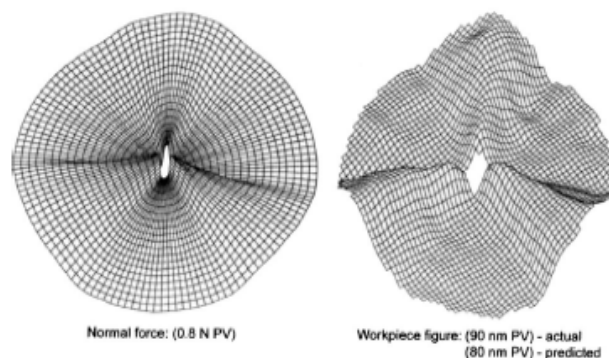


Fig. 26 Fuerza de corte normal y perfil de la superficie medida en una pieza mecanizada de CaF_2 a 1200 rpm y un avance de $4\mu\text{m/rev}$ [31]

En análisis espectral de las señales de emisión acústica son utilizadas para caracterizar el estado de desgaste de la herramienta y para reducir el error de forma en un 20% en las piezas mecanizadas con SPDT, ayudándose de un controlador PI con una compensación en el retardo [32]. La utilización de un sistema multisensorial al proceso del nano y microtorneado es un buen candidato para mejorar las prestaciones de éste último [33-34].

3.3 Estudio de las técnicas de Inteligencia Artificial y su aplicabilidad.

Los sistemas de monitorización y supervisión del proceso de corte, disponibles comercialmente, son solo aplicables a procesos de mecanizado convencionales. No ofrecen las prestaciones (por ejemplo, tiempos de respuesta muy elevados) ni disponen de las estrategias más adecuadas de toma de decisión para procesos de micro/nano fabricación.

La siguiente tabla resume esos productos comerciales y los principios técnicos en los que están basados. La tabla 1 muestra las estrategias utilizadas por 6 de las empresas líderes en la fabricación de sistemas de monitorización. Los sistemas simples con umbrales son los más utilizados para detectar fallos, y por tanto se producen falsas alarmas. El método de la “firma de la pieza” (*part signature*) es uno de que comienza a implantarse pero tiene todavía muchas limitaciones técnicas.

Estrategia\Empresa	ARTIS	BRANKAMP	KISTLER	MONTRONIX	NORDMAN	PROMETEC
Umbrales fijos				•	•	•
Umbrales variables en el tiempo			•		•	•
Firma de la pieza	•	•	•	•	•	

Tabla 1. Estrategias usadas por seis fabricantes para la monitorización de procesos de mecanizado.

La siguiente tabla resume algunas de las estrategias más contemporáneas para el modelado basadas en técnicas de Inteligencia Artificial y su aplicación a procesos de mecanizados. Hasta la fecha de elaboración de este informe, no se ha tenido acceso a reportes de estudios y aplicación de estas técnicas en procesos de nanotorneado.

Modelado, Monitorización y Supervisión	En relación con	Autores
Redes neuronales anticipativas en operaciones de fresado.	Herramienta	Alique et al., 2000 [35]
Perceptrón multicapa. Aplicación en tiempo real en el fresado	Proceso	Haber et al., 2001 [36]
Estudio comparativo de modelos basados en redes neuronales.	Proceso	Haber et al. 2002 [37]
Modelo basado en algoritmos genéticos para la predicción de la fuerza de corte en operaciones de fresado	Herramienta	Milferner et al., 2005
Modelos teóricos y experimentales del proceso de rectificado basados en la Lógica Borrosa y las Redes Neuronales.	Calidad Superficial	Maksoud y Atia, 2004
Estimación de la condición de la herramienta de corte utilizando mapas auto-organizados en torneado.	Herramienta	Rao y Srikant, 2004
Monitorización de torneado basada en: filtrado de características redundantes por medio agrupamiento borroso, y fusión sensorial y utilizando redes neuronales.	Herramienta	Fu y Hope, 2004
Modelo borroso Takagi-Sugeno para la estimación de las condiciones de rectificado en las que se produce el “burns out”.	Herramienta	Ali y Zhang, 2004
Sistema borroso en el fresado para la supresión de las vibraciones	Vibraciones	Liang, Yeap y Hermansyah, 2004
Modelo basado en algoritmos genéticos para la predicción de la fuerza de corte en operaciones de fresado	Herramienta	Milferner et al., 2005

Los sistemas de monitorización y supervisión de procesos de micro y nano-fabricación, y en específico de procesos de nanotorneado están en fase de estudio e investigación de laboratorio en universidades, centros de investigación y centro tecnológicos en todo el mundo. Su incorporación a la industrial según el estudio realizado. La siguiente tabla resume algunas de las estrategias de monitorización y supervisión que se están llevando a cabo a nivel de laboratorio que involucran técnicas basadas en Inteligencia Artificial para los procesos de mecanizado:

Control borroso simple en el proceso de fresado.	Haber et al., 1996 [38]
Regulación de la fuerza de corte basado en un control por modo deslizante adaptativo. Red neuronal en el modelado para calcular las ganancias del controlador.	Buckner 2001
Perceptrón multicapa en el modelado para la selección de condiciones de corte (off-line).	Wong y Hamouda, 2003
Modelo borroso para la selección de condiciones de corte en condiciones de no solapamiento (off-line).	Hashmi et al., 2003
Control borroso embebido en una arquitectura abierta,	Haber et al. 2003 [39]
Red neuroborrosa para la estimación de la fuerza de corte y la monitorización del desgaste de la herramienta de corte.	Li X.L. et al., 2004
Modelos borrosos para la selección de condiciones de corte para aleaciones de acero.	Tan et al., 2004
Red borrosa adaptativa para el modelado de la rugosidad superficial.	Jiao et al., 2004
Control por modelo interno basado en redes neuronales. Aplicación al proceso de fresado.	Haber et al., 2004 [40]
Algoritmos genéticos para la generación y optimización de programas basados en modelos CAD.	Kovacic et al., 2005
Redes borrosas adaptativas para el modelado del error dimensional (off-line).	Jiao et al., 2005

Control por modelo interno borroso y neuronal. Aplicación al fresado.	Haber et al., 2005 [41]
Comparación de modelos AR clásicos y neuroborrosos en la predicción de las fuerzas y el desgaste del útil de corte.	Kothamasu et al., 2005
ANFIS para predecir la rugosidad superficial y establecer la relación entre rugosidad y textura basada en imágenes.	Lee, Ho SJ. Y Ho SY., 2005
Control borroso multivariable del par de corte.	Haber et al., 2006 [42]
Control borroso multivariable embebido en CNC abierto.	Haber y Alique, 2007 [43]
Control borroso en red del proceso de taladrado.	Haber et al., 2008[44]

La siguiente figura muestra los campos de investigación y su estado actual de acuerdo con tres status: teórico (en amarillo), experimental (en verde) y posible aplicación industrial.

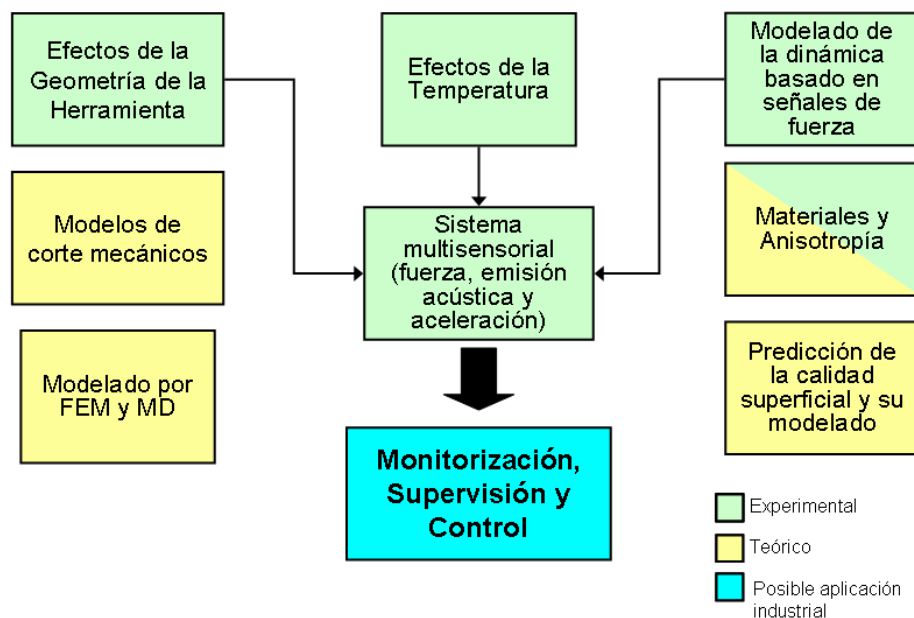


Fig. 27. Situación actual a nivel teórico, experimental y posible introducción industrial.

3.4 Estudio y evaluación de las técnicas de monitorización red. Plataformas disponibles.

Los avances en las ciencias de la computación y las comunicaciones, hacen posible en la actualidad el desarrollo de sistemas remotos o en red de monitorización, supervisión y/o control de procesos industriales. Entre las ventajas de estos sistemas están la centralización del control y supervisión de los subsistemas de la planta, la telemonitorización, la distribución del conocimiento del proceso, entre otros. La comunidad investigadora está actualmente muy activa en todos los aspectos de los sistemas de control en red, existiendo un estado del arte con varias aproximaciones dependiendo del

área de estudio en la que se centren. Por ejemplo el estudio de los problemas que existen relacionados con el control en red (control de la congestión, modelado de retardos, estabilidad del sistema, etc.), análisis y diseño de sistemas, arquitecturas y protocolos, y los estudios experimentales. La tendencia actual en el campo de la automatización industrial es de sustituir en gran parte los buses de campo y redes industriales por soluciones basadas en Ethernet y redes inalámbricas.

Se estudiaron los sistemas intermediarios como base para desarrollar el sistema de monitorización en red. Los sistemas intermediarios (*middleware*) se pueden considerar como un software que materializa un nivel de abstracción entre las aplicaciones finales (o componentes de aplicaciones) y los elementos de bajo nivel como pueden ser el hardware, las redes de comunicación, o el sistema operativo. CORBA (*Common Object Request Broker Architecture*) es un estándar para *middleware* orientado a objetos definido por el *Object Management Group* (OMG). La principal característica de este estándar es que permite a las aplicaciones utilizar la funcionalidad de objetos sin importar su localización física, el lenguaje en que estén desarrollados, el hardware o sistema operativo sobre el que estén implementados, ni los protocolos que se utilicen como medio de comunicaciones.

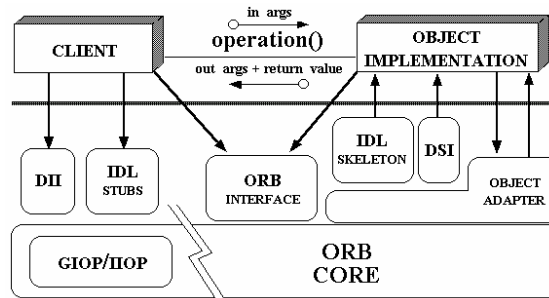


Fig. 28 Diagrama de la estructura de CORBA

Entre los paradigmas disponibles se estudió CORBA como posible vía para el desarrollo de nuestro sistema frente a otros debido a las especificaciones que permiten alcanzar un alto grado de flexibilidad y transparencia para operaciones remotas, su alto rendimiento y la posibilidad de integrar diferentes lenguajes y plataformas de hardware y software [45-46]. Además la especificación RT-CORBA contempla importantes requisitos de calidad de servicio (QoS) que requieren las aplicaciones con restricciones de tiempo real, y que otros sistemas intermediarios no tienen claramente definidos. En concreto define un conjunto de políticas relacionadas con prioridades de ejecución, comunicaciones, hilos de ejecución, etc. Mediante la parametrización de estas políticas cada parte de la aplicación puede indicar al ORB la calidad de servicio que requiere.

Sin embargo la necesidad de una solución que integre hardware y software, las cuestiones de garantías y servicios de post-venta, los requisitos de tiempo real, entre otras cuestiones definieron la necesidad de utilizar un sistema propietario basado en una plataforma industrial. Los sistemas de monitorización y adquisición de datos en red basados en plataformas industriales como el sistema PXI de National Instruments ofrecen las prestaciones necesarias. En específico las plataformas PXI y el sistema de tiempo real PXI-8187/8186RT permite embeber aplicaciones de tiempo real críticas desarrolladas en Labview y al mismo tiempo desarrollar estrategias de monitorización en red vía Ethernet o Internet con requisitos de tiempo real flexible, tal y como se detalla a continuación.

3.5 Instalación de sensores de fuerza, aceleración y emisión acústica en un torno de ultra precisión

Desde el punto industrial a medida que aumenta el número de sensores instalados aumenta información disponible acerca del proceso de nanotorneado, pero se incrementa la complejidad del procesamiento y la dificultad en el cumplimiento de los requisitos para la medición y el procesamiento. Desde el punto vista económico, el incremento de los sensores aumenta considerablemente el coste final del sistema de monitorización inteligente del proceso.

La medición de la posición y los desplazamientos de las piezas son también importantes en el nanotorneado. **La medición directa del movimiento relativo entre la herramienta y la pieza de trabajo se efectúa por ejemplo utilizando una galga capacitiva** en el eje z. Empleando esta desviación como señal de error, junto a un servo de rápido accionamiento para la herramienta se pueden reducir los errores producidos por las vibraciones a baja frecuencia, mejorando el acabado superficial con un mínimo de *hardware* añadido.

El sistema MicroSense 6810 (figura 29), de alta resolución es un sistema de medición de la distancia o desplazamientos ideal para rangos de medición de hasta 2 milímetros. Se combina con un sensor capacitivo 6504-01 proporcionando mediciones del orden del nanómetro (rango de medición de $\pm 25\mu\text{m}$ y precisión de 1 nm a 100kHz). Este instrumento tiene características seleccionables por el usuario y un ancho de banda de hasta 100 kHz. Precisamente su utilidad en detección de vibraciones del cabezal radica en que puede medir la excentricidad en ejes de rotación de muy alta velocidad. Es por ello que se adquirió, tal y como estaba previsto en la memoria, este sensor capacitivo de medición.



Fig. 29 Sistema Microsense 6810 para la medición de desplazamientos.

Primeramente se instalaron sensores de emisión acústica y de aceleración. Las razones fundamentales desde el punto de vista industrial fueron su no interferencia con el proceso de corte y su robustez. Desde el punto de vista técnico ambos sensores tienen un ancho de banda en las frecuencias medias y altas frecuencia que permite capturar toda la información del proceso. Además tienen una respuesta bastante rápida. Además, se instaló un sensor de fuerza. Su principal ventaja es la velocidad de respuesta y la medición de una variable directa como es la fuerza de corte. Mientras que su alto coste

y su interferencia con el proceso son sus principales inconvenientes para su aplicación industrial.

En la figura 30 se muestra una vista general de los sensores externos instalados para el sistema de monitorización.

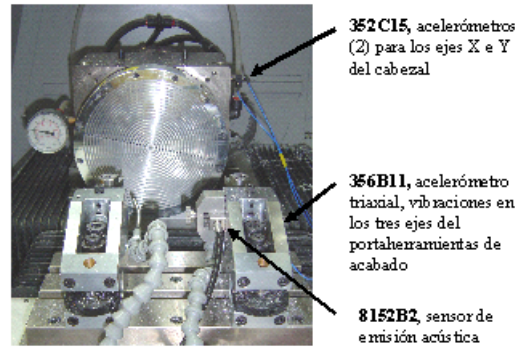


Fig. 30. Vista general de los sensores externos instalados en el sistema de monitorización.

El sensor de emisión acústica está colocado al lado del porta herramienta (*tool holder*) y está fijado mediante un imán (ver Figura 31). El sensor instalado es del modelo **8152B2** de Kistler, el cual lleva implícito un convertor de impedancias para la medición de AE por encima de 50 kHz en estructuras de máquinas. El sensor es de pequeño tamaño y de fácil montaje. El rango de aplicación es desde 100 a 900 kHz.

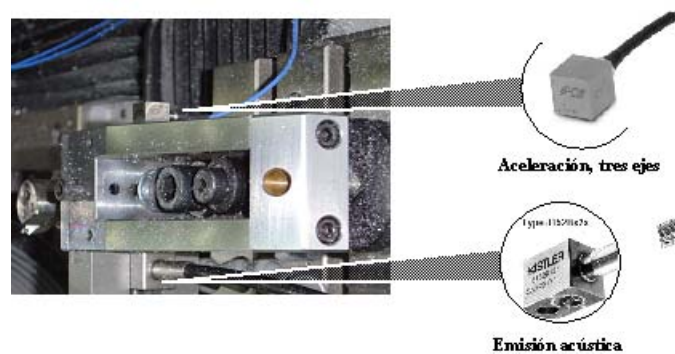


Fig. 31. Detalles de montaje del sensor de emisión acústica 8152B2 y del sensor triaxial de aceleración 356B11.

El sensor de aceleración, modelo **356B11** de PCB Piezotronics, es capaz de medir vibraciones o choques y está compuesto por tres elementos de medición independientes capaces de responder ante movimientos a lo largo de los tres ejes X, Y y Z. Presenta una sensibilidad de 10 mV/g (1.02 mV/(m/s²)) y un rango de frecuencia de trabajo desde 2 Hz hasta 10 kHz.

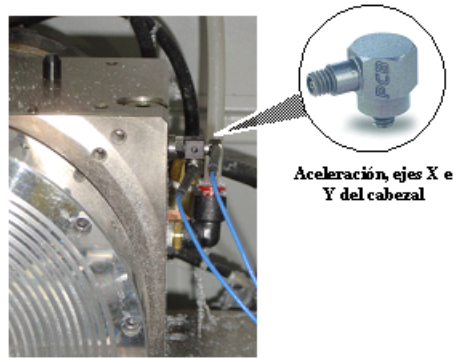


Fig. 32. Detalles de montaje de los acelerómetros modelos 352C15

El sensor fuerza de Kistler **9256C2** es el único disponible comercialmente para las prestaciones requeridas y tiene las siguientes características: volumen de trabajo de al menos 75x80x200mm, rangos de medidas (eje X,Y,Z) $< \pm 300$ N, rango de calibración de 0 a 30 Newton para cada canal, sensibilidad ejes X e Z < 30 pC/N, sensibilidad eje Y < 15 pC/N, linealidad: $< \pm 0.5$ % FSO y frecuencia natural de cada eje > 5 kHz. En la Figura 33 muestra el sensor y el amplificador/acondicionador de señales utilizado.

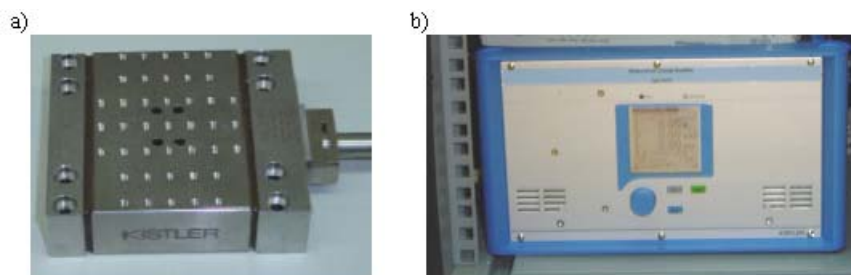
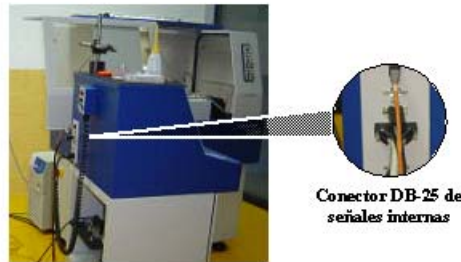


Fig. 33. a) Sensor de fuerza utilizado 9256C2. b) Amplificador de carga multicanal 5070A.

Con el objetivo de obtener información de la posición y los desplazamientos de los ejes de la máquina, se realizó una conexión que permite la medición de las señales de posición X, Y y Z a través del CNC. Se realizó la conexión por medio de un conector paralelo DB-25, el cual tiene 16 líneas digitales. Las señales de mayor importancia son las relacionadas con los ejes X y Z y las que proveen información sobre el cabezal. Los ejes X y Z son lineales, y tienen *encoders* lineales. El *encoder* Sony Laserscale BD15 produce las señales de posición y velocidad a través de 4 líneas: CHA, CHB, CHA_A, y CHB_B. CHA y CHA_A son opuestos, cuando CHA es 1, CHA_A es 0 y viceversa. Para ambos ejes, X y Z, se transmiten las mismas señales. Los *encoders* se encuentran situados dentro de la máquina. Por otra parte, del cabezal solamente se proveen 3 señales CHA, CHB, y CHX, las dos primeras son iguales, pero CHX es un pulso que se activa por cada revolución del cabezal. En la Figura 34 se muestra una vista del cable y su conexión a la máquina.



3.6 Adquisición y procesamiento de señales de los sensores instalados y de las señales internas del CNC. Aplicación de técnicas de procesamiento señales digitales

El diagrama de conexión del sistema de adquisición y su implementación con todos sus componentes hardware se muestra en la Figura 35. En un PC conectado a la Intranet de la empresa vía Ethernet es el encargado de ejecutar los programas de monitorización que funcionan en tiempo real estricto en la plataforma PXI-1050 con tarjeta PXI-8187, que será descrita más adelante. Dos tarjetas de adquisición de datos PXI-6132 y PXI-6259 son las encargadas de convertir las señales analógicas de los sensores en señales digitales. Estas tarjetas se conectan con amplificadores de carga (Kistler 5125, Kistler 5070A) que a su vez se conectan con los sensores. El acondicionador de señales PZT482A22 es el encargado de preparar las señales de los acelerómetros ICP. Todas las señales se distribuyen desde/hacia la caja de conexión SCB68. Finalmente a esta caja llega las señales internas por medio del conector DB25 conectado al torno de Precitech.

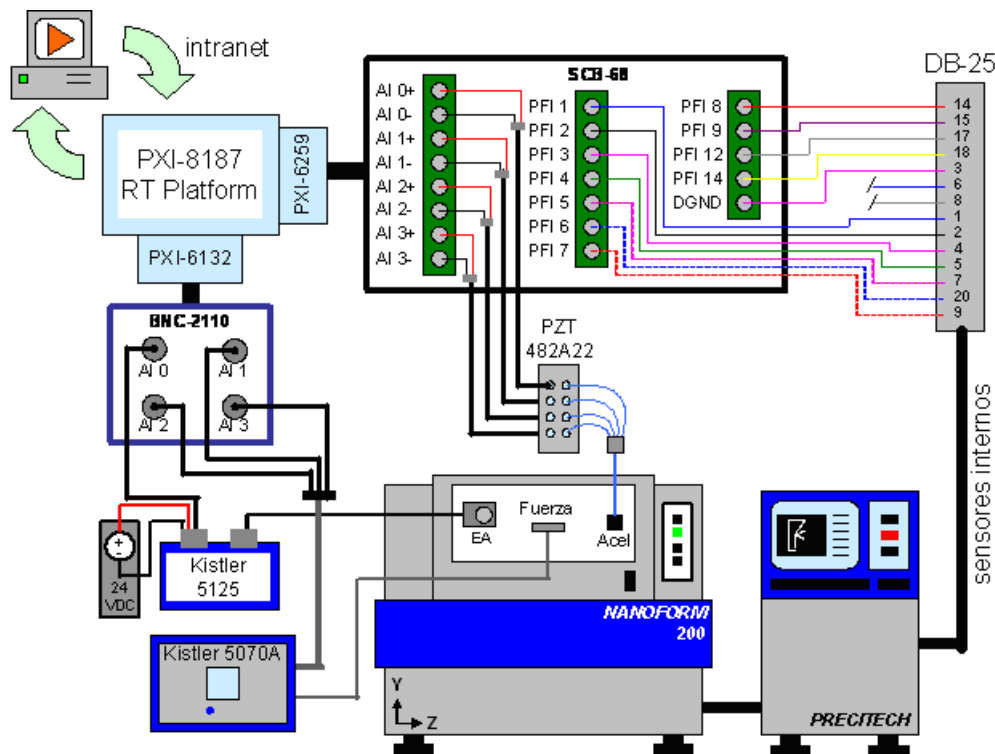


Figura 35. Diagrama general y esquema de conexión del sistema de monitorización

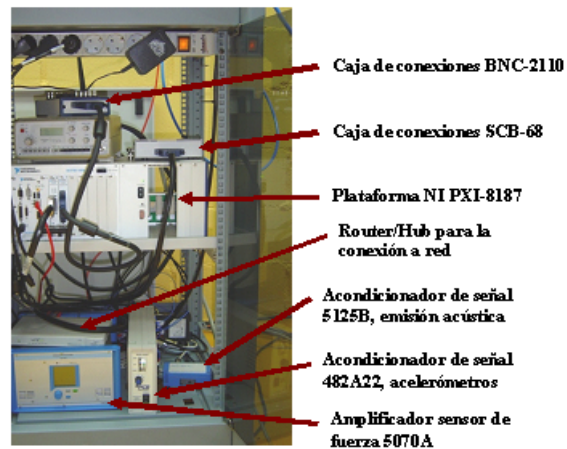


Figura 36. Disposición física de varios dispositivos en un armario eléctrico.

La instalación física y la disposición final de los componentes en el armario se muestran en la Figura 36. Incluyendo el *router* que permite la conexión a red del sistema. En la Figura 37 se muestra la plataforma de adquisición PXI-1050 equipada con el proceso de tiempo real de *National Instrument* PXI-8187. Se trata de una plataforma abierta con estructura modular basada en una arquitectura de ordenadores para la medición y el control. Tiene un gran ancho de banda y una latencia muy pequeña, además admite varias tarjetas de entrada y salida. PXI son las siglas de *PCI eXtensions for Instrumentation*. El PXI-8187 no es más que un controlador de alto rendimiento con un procesador PENTIUM 4 embebido. La plataforma PXI está compuesta básicamente de tres componentes, el chasis, el controlador y los módulos periféricos.



Fig. 37 Vista general de la plataforma PXI, mostrando sus componentes.

El chasis provee un embalaje modular de gran dureza para el sistema. Este contiene el *backplane* PXI de alto rendimiento, el cual contiene el bus PCI y los buses para tareas de sincronización. Mediante el empleo de los buses de sincronización es posible desarrollar sistemas para aplicaciones que requieran un alto nivel de sincronismo. El controlador PXI-8187 se instala en una ranura específica del chasis para él (1ra ranura). Entre las posibles opciones del controlador incluye la posibilidad de ser controlado remotamente desde un ordenador de mesa, una estación de trabajo, un servidor o un ordenador portátil, además de ser un controlador embebido de un rendimiento muy alto con un sistema operativo, ya sea *Windows 2000/XP* o un sistema operativo en tiempo

real como *LabView Real-Time*, que es el empleado actualmente para el desarrollo del software.

En las ranuras disponibles para los módulos periféricos es posible instalar tarjetas para entradas y salidas analógicas, interfases de comunicación, entradas y salidas digitales, de procesamiento de señales, para adquisición de imágenes, de control de movimiento, como fuente de suministro, temporizadores, etc.

Se han utilizado dos tarjetas PXI-6259 y PXI-6132, la primera es una tarjeta de adquisición de datos multifunción de alta velocidad. Posee 4 salidas y 32 entradas analógicas de 16 bit de resolución, con una frecuencia de adquisición de hasta 2.8 MS/s, tiene además 48 E/S digitales y contadores de 32 bit. La tarjeta PXI-6132 es para adquisición de datos a alta velocidad, posee 4 canales de entradas analógicas diferenciales de 14 bit de resolución, pudiendo tener rangos de entrada para cada canal y frecuencia de adquisición también diferente para cada uno de hasta 3 MS/s, posee además contadores o temporizadores de 24 bit de resolución.

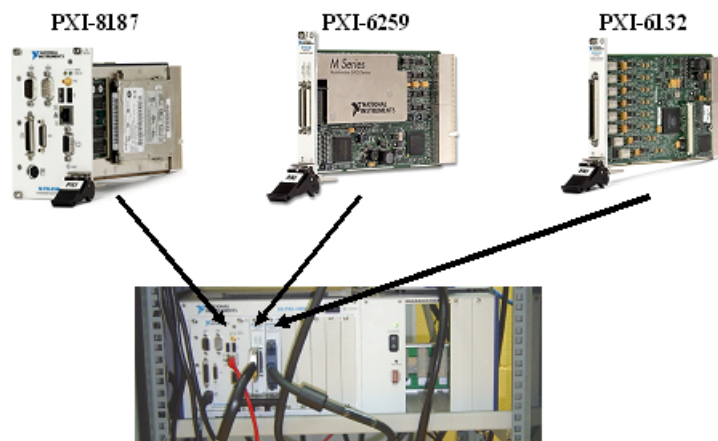


Fig. 38 Plataforma PXI instalada y los módulos que la componen.

Con respecto a las señales internas de posición y velocidades angulares el DB-25 está conectado a la caja SCB-68 de NI. Se están midiendo las posiciones de los ejes y la velocidad de giro del cabezal. Se utiliza un programa **Labview** para la adquisición de señales.

En la Figura 39 se muestra la interfaz de usuario correspondiente al sistema de monitorización de señales. En la parte izquierda superior (en rectángulo azul) aparecen los datos de las tarjetas de adquisición de datos instaladas (PXI-6259, PXI-6132) y los correspondientes canales analógicos de medición (ai0, ai1, ai2, ai3) y de los contadores (Ctr0, Ctr1) para la medición de la posición.

La información de la prueba aparece enmarcada en un rectángulo rojo. Aquí se muestra el número de la pieza, el operador que la está fabricando, el grado de balance del husillo, la longitud del experimento. Además, hay un botón para guardar las señales de aceleración (*Record Raw Accel*).

En la parte izquierda, más abajo, se muestra, enmarcado en rectángulo amarillo, información de los valores RMS de los acelerómetros. Además se puede almacenar

información (botón verde *Spindle Off*) sin haber comenzado a fabricar la componente aeronáutica. Esta información es muy útil para el filtrado de las señales.

Finalmente en la parte izquierda inferior, marcada en verde, aparece información adicional de los ficheros almacenados y su tamaño.

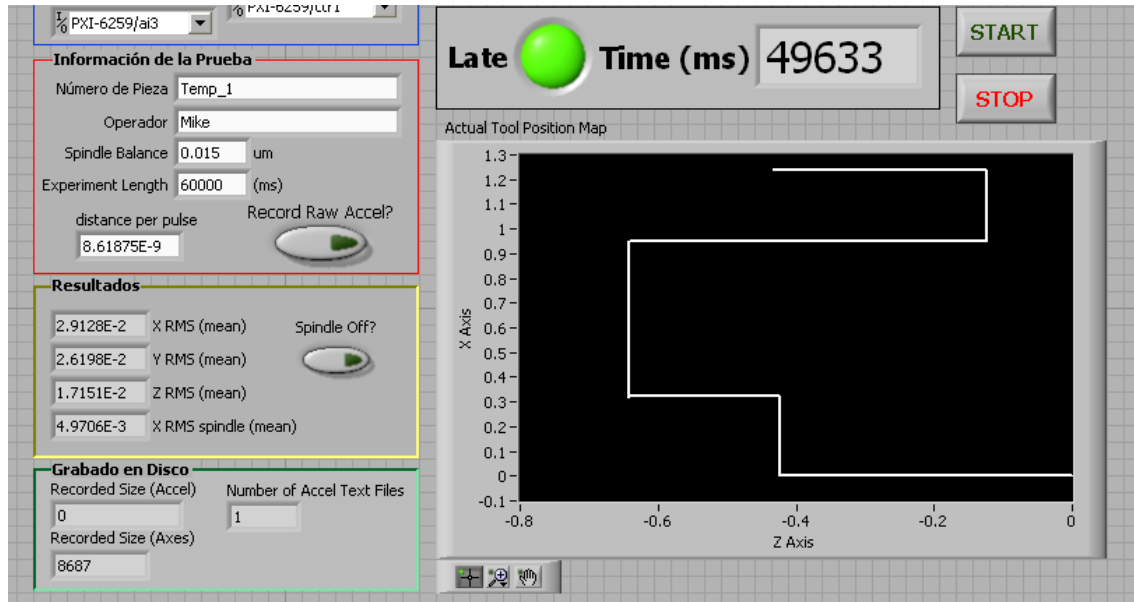


Fig. 39 Interfaz de usuario para la monitorización de señales internas (CNC) y externas.

La información más útil para el operador aparece en la parte derecha de la interfaz de usuario. En la parte superior derecha aparece la información de la velocidad de giro (2000 rpm), las posiciones de los ejes X y Z (mm). Además aparece la información de los valores RMS de los acelerómetros en cada eje (X,Y, Z) y del husillo. Dos botones *START* y *STOP* permiten comenzar y finalizar la ejecución del programa. La figura le permite al operador conocer la posición de la herramienta de corte durante el funcionamiento de la aplicación (*Actual tool position map*).

Como se puede observar tanto la información interna (posiciones de los ejes) como la externa (sensores de aceleración y emisión acústica) se puede almacenar y mostrar durante la fabricación de la pieza, siendo de gran utilidad para el operador que no tiene que estar físicamente cerca de la máquina para conocer como marcha el proceso de corte. Esto es posible ya que el sistema se puede estar ejecutando en un PC remoto conectado a la red. De este modo, el departamento de control de calidad puede conocer cómo se está desarrollando el proceso de fabricación.

El comportamiento de dos de las señales monitorizadas durante el proceso de corte tanto en el dominio del tiempo como el dominio frecuencial se muestra en la Figura 40.

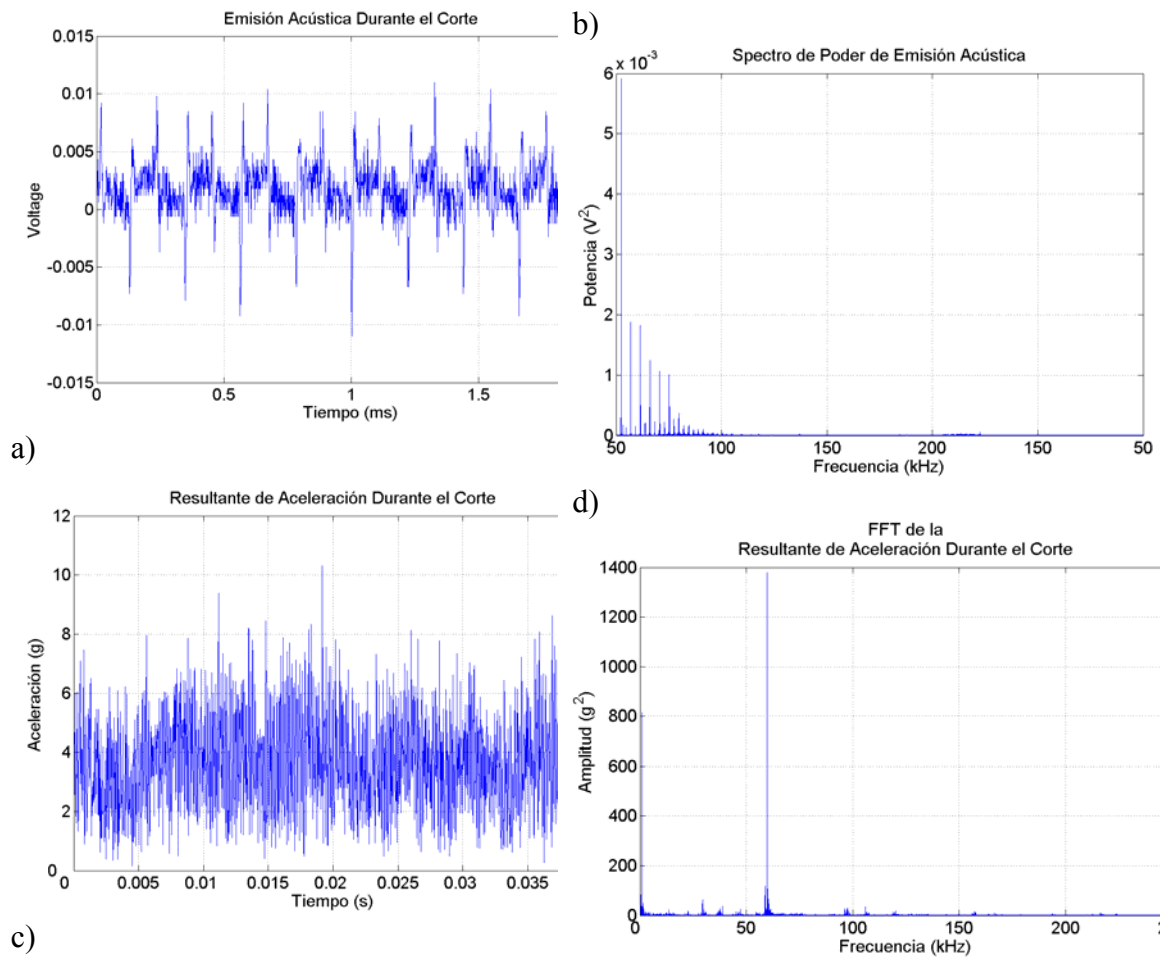


Fig. 40. Comportamiento de las señales monitorizadas del sensor de emisión acústica en el dominio del tiempo (a) y en dominio frecuencial (b), y la aceleración resultante en el cabezal (a) en dominio del tiempo (c) y en el dominio frecuencia (d).

Conclusiones

En este informe se recoge una revisión del estado del arte en los campos y temáticas relacionadas con el corte en la micro y nanoescala, las técnicas de inteligencia artificial y la monitorización en red de procesos de fabricación. Igualmente se presenta el diseño e implementación de un sistema de monitorización del proceso de corte y medición de las señales que lo caracterizan. Los trabajos futuros están dirigidos hacia el diseño e implementación de un sistema de monitorización inteligente y en red de la rugosidad superficial de componentes aeronáuticos especiales, así como la evaluación del comportamiento de las estrategias de monitorización desarrolladas y su efectividad.

Referencias

1. T. Masuzawa, *State of the Art of Micromachining*, Annals of the CIRP 49 (2000) (2), pp. 473–488.
2. R. Bueno, *Primer Congreso Internacional de Diseño, Tecnologías e Ingeniería de Producto (Protodesign)*, Fundación Tekniker, 2000.
3. *Market Analysis for Microsystems II - 2000-2005*, A Nexus Task Force Report, February 2002. Estudio financiado por la U.E.
4. P. Perlo, *From micro to nanotechnology - a “natural” evolution involving the automotive context*. Proceedings of 2nd. Euspen International Conference, Turín (Italia), Mayo 2001.
5. R.R. Donaldson and S.R. Patterson, *Desing and Construction of a Large, Vertical Axis Diamonds Turning Machine*, Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, vol. 433, pp. 62-67, 1983
6. Paul, Evans, Mangamelli, McGauflin, and Polvani, *J. Prec. NSR*. Vol. 18, No. 1, 1996, pp.4-19
7. Sohn, A., *Modelling of vibration in SPDT*, American Society for Precision Engineering
8. E. R. Marsh, B.P. John, J.A. Couey, J. Wang, R.D. Grejda, and R.R. Vallance, *Predicting surface figure in diamond turned calcium fluoride using in-process force measurement*, Journal of Vacuum Science & Technology B, vol.23, pp.84-89, Jan-Feb 2005
9. A. Herrero, L. Uriarte y S. Azkarate, *Micromecanizado mediante fresado, electroerosión de hilo y de penetración y nanotorneado (I)*, Fundación Tekniker.
10. C.M. Valente (Universidad de Sao Paulo) y D. Dornfeld (UC Berkeley) *Analysis of Tool And Workpiece Interaction in Diamond Turning using Graphical Analysis of Acoustic Emission*.
11. W.B. Lee, S. To, and C.F. Cheung, *Effect of crystallographic orientation in diamond turning of copper single crystals*, Scripta Materialia, vol.42, pp.937-945, May 2000
12. DINAME 97 - 7th International Conference on Dynamic Problems in Mechanics, 3 - 7 March 1997, Angra dos Reis, RJ, Brazil.
13. S.R. Patterson and E.B. Magrab, *Design and Testing of a fast Tool Servo for Diamond Turning*, Precision Engineering-Journal of the American Society for Precision Engineering, vol.7, pp.123-128, 1985
14. Boothroy, G., Knight, W.A. (1989), *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, Marcel Dekker, NY
15. Pamies, J.J. (2001), *Fundamentos Físicos do Corte dos Metais*, Edinova, Universidad Nova de Lisboa.
16. R. E. Haber, J. E. Jiménez, A. Jiménez, and J. López-Coronado, *Cutting force model for high speed machining process*, Revista de Metalurgia (Madrid), vol. 40, pp. 247-258, 2004..
17. Haber R.E., J. E. Jimenez, C. R. Peres, and J. R. Alique, *An investigation of tool-wear monitoring in a high-speed machining process*, Sensors and Actuators a-Physical, vol. 116, pp. 539-545, Oct 2004.
18. I.H. Choi, y J.D. Kim, *Development of monitoring system on the diamond tool wear*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 39, pp.505-515, Mar 1999

19. D. E. Lee, I. Hwang, C. M.O. Valente, J. F. G. Oliveira, y D.A. Dornfeld, *Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 46, pp.176-188, Feb 2006
20. C. K. Ng, S. N. Melkote, M. Rahman, y A. S. Kumar, *Experimental study of micro and nano-scale cutting of alluminum 7075-T6*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 46, pp. 929-936, Jul 2006
21. T. G. Bifano y Y. Yi, *Acoustic- Emission as a Indicator of Material-Removal Regime in Glass Micromachining*, Precision Engineering-Journal of the America Society for Precision Engineering, vol.14, pp. 219-228, Oct 1992
22. NASA, Practise NO. PD-ED-1265, *Precision Diamond Turning Of Aerospace Optical Systems*
23. C. F. Cheung and W. B. Lee, *Surface Generation in Ultra-Precision Diamond Turning: Modelling and Practices*, Series Editor Duncan Dowson, pp.8-22
24. J. W. Insaustia, P. Benedettia, L. Iurmanb, A. Lucaiolib, P. Traversaa y N. Mazinib, *Comparación de rugosidades de superficies medidas con un rugosímetro electromecánico y con análisis de imágenes de microscopía electrónica*, Jornadas SAM 2000 - IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga.
25. J. H. Burge y J. C. Wyant, *Use of Computer Generated Holograms for Testing Aspheric Optics*, Optical Sciences Center, University of Arizona /Tucson).
26. J. D. Drescher y T. A. Dow, *Tool Force Model Development for Diamond Turning*, Precision Engineering-Journal of the American Society for Precision Engineering , vol.12, pp.29-35, Jan 1990
27. C. K. Ng, S. N. Melkote, M. Rahman, y A. S. Kumar, *Experimental study of micro and nano-scale cutting of alluminum 7075-T6*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 46, pp. 929-936, Jul 2006
28. B.C. Ulmer y T. R. Kurfess, *Integration o fan open architecture controller with diamond turning machine*, Mechatronics, vol.9, pp. 349-361, Jun 1999
29. T. G. Bifano y Y. Yi, *Acoustic- Emission as a Indicator of Material-Removal Regime in Glass Micromachining*, Precision Engineering-Journal of the America Society for Precision Engineering, vol.14, pp. 219-228, Oct 1992
30. J. J. Liu y D. A. Dornfeld, *Modelling and analysis of acoustic emission in diamond turning*, Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME, vol. 118, pp. 199-207, May 1996
31. Marsh, John, Couey, Wang and Grejda, *Predicting surface figure in diamond turned calcium fluoride using in-process force measurement*, Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, vol.23, no 1, pp 84-89, 2005.
32. Y. Nakao y D. A. Dornfeld, *Diamond turning using position and AE dual feedback control system*, Precision Engineering-Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, vol.27, pp. 117-124, Apr 2003.
33. Toro R. M. Del, R. E. Haber, and M. Schmittiel, *A distributed intelligent monitoring system applied to a micro-scale turning process*, in Lecture Notes in Computer Science vol. 5518 LNCS, 2009, pp. 338-345.
34. Gajate A., R. E. Haber, J. R. Alique, and P. I. Vega, *Transductive-weighted neuro-fuzzy inference system for tool wear prediction in a turning process*, in Lecture Notes in Computer Science vol. 5572 LNAI, ed, 2009, pp. 113-120.

35. Alique A., R. E. Haber, R. H. Haber, S. Ros, and C. Gonzalez, *Neural network-based model for the prediction of cutting force in milling process. A progress study on a real case*, in IEEE International Symposium on Intelligent Control - Proceedings, 2000, pp. 121-125.
36. Haber R. E., R. H. Haber, C. R. Peres, A. Alique, and S. Ros, *Model of the milling process on the basis of cutting force: A neural network-based approach*, Advances in Neural Networks and Applications, pp. 378-383, 2001.
37. Haber R. E., R. H. Haber, A. Alique, S. Ros, and J. R. Alique, *Dynamic model of the machining process on the basis of neural networks: From simulation to real time application*, in Lecture Notes in Computer Science vol. 2331 LNCS, ed, 2002, pp. 574-583.
38. Haber R., J. Alique, S. Ros, and C. R. Peres, *Fuzzy supervisory control of end milling process*, Information sciences, vol. 89, pp. 95-106, 1996.
39. Haber R. E., J. R. Alique, A. Alique, and J. E. Jiménez, *Embedded fuzzy control system: Application to an electromechanical system*, in Lecture Notes in Computer Science vol. 2658, ed, 2003, pp. 812-821.
40. R. E. Haber and J. R. Alique, *Nonlinear internal model control using neural networks: An application for machining processes*, Neural Computing and Applications, vol. 13, pp. 47-55, 2004.
41. Haber R. E., J. R. Alique, A. Alique, and R. Haber, *Controlling a complex electromechanical process on the basis of a neurofuzzy approach*, Future Generation Computer Systems, vol. 21, pp. 1083-1095, 2005.
42. Haber-Guerra R., S. Y. Liang, J. R. Alique, and R. Haber-Haber, *Fuzzy control of spindle torque in high-speed milling processes*, Journal of manufacturing science and engineering, vol. 128, pp. 1014-1018, 2006.
43. Haber R. E. y J. R. Alique, *Fuzzy logic-based torque control system for milling process optimization*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), vol. 37, pp. 941-950, 2007.
44. Haber-Guerra R.E., R. Haber-Haber, D. M. Andr  s, and A. A. Palomar, *Networked fuzzy control system for a high-performance drilling process*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol. 130, p. 031009, 2008.
45. R. E. Haber, K. Cantillo, and J. E. Jiménez, *Networked sensing for high-speed machining processes based on CORBA*, Sensors and Actuators A: Physical, vol. 119, pp. 418-426, 2005.
46. Cantillo K., R. E. Haber, J. E. Jiménez,  . Alique, and R. Galán, *CORBA-Based open platform for processes monitoring. An application to a complex electromechanical process*, in Lecture Notes in Computer Science vol. 3036, ed, 2004, pp. 523-526.