

REAL ACADEMIA DE INGENIERÍA

SON MÁQUINAS HERRAMIENTA
Y SON LAS PERSONAS

DISCURSO DEL ACADÉMICO ELECTO

EXCMO. SR. D. LUIS NORBERTO LÓPEZ DE LACALLE MARCAIDE

LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN PÚBLICA
EL DÍA 12 DE MARZO DE 2024

Y CONTESTACIÓN DEL ACADÉMICO

EXCMO. SR. D. JAIME DOMÍNGUEZ ABASCAL



MADRID MMXXIV

SON MÁQUINAS HERRAMIENTA
Y SON LAS PERSONAS

REAL ACADEMIA DE INGENIERÍA

SON MÁQUINAS HERRAMIENTA
Y SON LAS PERSONAS

DISCURSO DEL ACADÉMICO ELECTO

EXCMO. SR. D. LUIS NORBERTO LÓPEZ DE LACALLE MARCAIDE

LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN PÚBLICA
EL DÍA 12 DE MARZO DE 2024

Y CONTESTACIÓN DEL ACADÉMICO

EXCMO. SR. D. JAIME DOMÍNGUEZ ABASCAL



MADRID MMXXIV

Obra producida en el ámbito de la subvención
concedida a la Real Academia de Ingeniería
por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

Editado por la Real Academia de Ingeniería
© 2024, Real Academia de Ingeniería
© 2024 del texto, Luis Norberto López de Lacalle Marcaide
ISBN: 978-84-95662-96-5
Depósito legal: M-5009-2024
Impreso en España

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	7
2. MI CARRERA Y LAS MÁQUINAS HERRAMIENTA	8
3. ¿QUÉ ES UNA MÁQUINA HERRAMIENTA?	13
4. LOS PROCESOS DE FABRICACIÓN, EL MECANIZADO	22
5. REQUISITOS A CUMPLIR POR UNA MÁQUINA HERRAMIENTA	41
6. PRECISIÓN EN EL PROCESO, MÁS ALLÁ DE LA MÁQUINA	49
7. LA MÁQUINA HERRAMIENTA EN 2024	52
8. VERIFICACIÓN Y AJUSTE DE LA MÁQUINA	92
9. Y LLEGARON LAS MÁQUINAS MULTITAREA	101
10. PROBLEMAS DE AYER Y HOY, VIBRACIONES EN EL MECANIZADO	108
11. LA NUEVA REVOLUCIÓN 4.0	116
12. MEDIR ES CLAVE, LA METROLOGÍA	135
13. PERO SON LAS PERSONAS	140
14. EL FUTURO, ¿ESTÁ NUBLADO?	148
15. MI EXPERIENCIA Y VISIÓN SUBJETIVA	162
16. CONCLUSIONES	164
17. AGRADECIMIENTOS	168
18. REFERENCIAS	171

1. INTRODUCCIÓN

Excelentísimo Sr. presidente, excelentísimos y estimados académicos y académicas, compañeros de profesión, familia del alma, amigas y amigos, no voy a ser diferente de los que me precedieron y lo primero es manifestaros mi sincero y profundo agradecimiento por haber sido elegido como miembro de número de esta academia por tan ilustres colegas. Tras los años de estudio y de ejercicio como ingeniero, profesor e investigador, llegar a estar aquí hoy es sin duda mi mayor éxito y logro profesional.

Gracias, espero estar a la altura de este honor en lo que sea mi humilde contribución a los trabajos futuros de esta institución.

También recordar al anterior depositario de la medalla número IV, el Excmo. Sr. D. José Luis Díaz Fernández, ingeniero de minas y muy ligado a temas de energía. Estar a su altura es casi imposible, dado que su servicio como ingeniero comprometido con España queda patente en su trayectoria. Un recuerdo emocionado.

Imagino que muchos de los que me precedieron también valoraron detenidamente cómo afrontar este discurso, considerando elegir un tema de interés y de profundidad tecnológica, pero que sea claramente un elemento característico de la actividad profesional del candidato.

En mi caso, soy ingeniero industrial, profesor de máquinas y de procesos de fabricación, y actualmente me dedico a la fabricación avanzada orientada al sector del motor aeronáutico en el CFAA, Centro de Fabricación Avanzada Aeronáutica. Por otro lado, soy y ejerzo mi labor profesional en el País Vasco donde se ubica un gran porcentaje de la producción de máquina herramienta española. Por ello elegiré este tema, las máquinas herramienta y sus procesos y también me referiré a las personas que trabajan en este sector y en sus sectores cliente.

Así tratar de máquinas herramienta es hablar de procesos de fabricación, es hablar de los sectores a los que sirve, todos involucrados en campos claves en la economía española y europea, es poder explicar cómo se cuida la formación de sus trabajadores y cómo se potencia el atraer a estudiantes y formarlos cuidadosamente. Por otra parte, un sector fuerte de máquina herramienta es estratégico para una nación, quizás no tanto por su peso o tamaño relativo en la economía sino por ser el medio de introducir y activar la innovación en todos sus clientes.

Como he dicho, es un sector que se ha esforzado y esfuerza por atraer a los jóvenes, y cuando yo lo fui pasé también a engrosar este grupo. Por tanto, el tema central de este discurso surgió de mi propia experiencia, como investigador y profesor de universidad, considerándome todavía hoy un aprendiz atento.

Hablemos pues de máquinas, hablemos de procesos, hablemos de cómo la nueva revolución industrial que se ha denominado cuarta tiene en las empresas de máquina herramienta su promotor y heraldo. Y reconozcamos que en el centro de esta industria se halla la clave del éxito de toda aventura y empresa humana: personas con talento, esfuerzo y tenacidad. En definitiva, las personas y su compromiso, personas con artículo definido, que han sido el motor para que este sector sea clave en nuestra nación, y por tanto responsables de que yo esté hoy aquí hablando de este tema.

Déjenme que comience ligando este discurso a mis propias experiencias, y explique cuando mi vida se acercó a este sector industrial. Tras ello ya retrocederemos en la historia para establecer algunos hitos y definir el estado de la técnica. Este pequeño desorden cronológico me permitirá explicar mejor mi vivencia personal en estos últimos casi cuarenta años, sin perder la idea de que un discurso debe exponer muy seria y profundamente una temática concreta.

2. MI CARRERA Y LAS MÁQUINAS HERRAMIENTA

Mi primera imagen relativa a este sector son los martillos pilones que vi funcionando a los diez o doce años, alguna vez cuando fui a buscar a mi padre a la empresa de herramienta de mano en la que trabajaba. Recuerdo vívidamente los martillos golpeando el acero al rojo, saliendo de las forjas en cada golpe una llave fija. Mentiría

si les dijera que allí surgió mi vocación, pero sí es un recuerdo real y se puede considerar mi primera experiencia personal hacia este sector. Con un padre trabajando en esta empresa, su ilusión era que algún hijo estudiase ingeniería. Ese fui yo.

Ya en sexto de carrera se me ofreció la oportunidad de realizar un Máster de robótica y automatización, temáticas que en aquellos finales de los 80 eran novedosas. En aquel entonces las carreras se regían por planes de estudios de los 60 y era complejo introducir en los programas los nuevos conceptos que ya en aquella época empezaban a ser claves. De hecho, la tercera revolución industrial estaba en su apogeo, pero no parecería haber permeabilizado en la enseñanza reglada de la ingeniería mecánica. Este Máster surgió del interés de la Diputación Foral de Vizcaya en formar a personal que pudiese ser promotor de los nuevos conceptos relacionados con los controles numéricos, los ordenadores en entornos de fabricación, los robots, y la automatización en general.

Estos conceptos estaban en su momento de euforia tecnológica, y especialmente dos ideas que fueron y siguen siendo claves: el denominado CIM, *Computer Integrated Manufacturing*, y los FMS, *Flexible Manufacturing Systems*. Un fruto del esfuerzo realizado por investigadores, profesores y alumnos de este máster se muestra en la figura 1, el denominado sistema Etorlan, que se presentó en la bienal de 1988 por parte del centro Robotiker, hoy integrado en Tecnalía-BRTA. Era una planta de producción piloto, organizada alrededor de un centro de fabricación para mecanizado simultáneo, y con vehículos guiados que trasportaban piezas y herramientas de corte.

La mayoría de los conceptos relativos al uso avanzado de ordenadores en producción surgieron en aquellos años, pero con muchas limitaciones en cuanto a software y hardware, que hoy día sí se han superado. Como he dicho, con este máster participé por primera vez en una feria que siempre he considerado como la “mía” y la natural tanto para mí como para mi grupo de investigación, la Bienal de Máquina Herramienta de Bilbao. Todavía hoy, cuando acudo a la feria el primer día y me asomo a los pabellones desde el pasillo de arriba, una sensación muy viva, casi de emoción, me inunda. Allí abajo se muestran máquinas avanzadas, muchas de ellas de fabricación nacional, y atienden a los visitantes muchos amigos y amigas, casi una comunidad o incluso una fraternidad. Personas de valor, verdaderos expertos, compañeros y compañeras de armas.

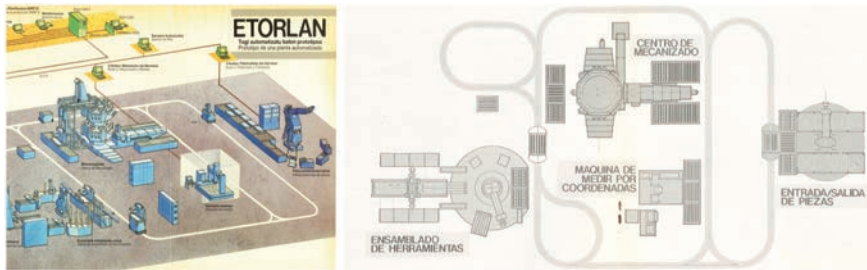


Figura 1: Sistema Etorlan presentado en la Bienal de MH de 1988.

Podríamos decir que mi término de estudios universitarios coincidió con los primeros indicios de lo que más tarde conduciría a la 4ª revolución industrial. Además, en 1991 tuve otra experiencia que me acercó decididamente al sector de la fabricación y de la máquina herramienta. Así, colaborando con una revista técnica de sede en Bilbao, tuve la oportunidad de estar toda una semana en la EMO de Hannover, la feria *Exposition Mondiale de la Machine-Outil*. En la guisa de periodista técnico infiltrado pude ver una gran feria, tanto en extensión en sus múltiples pabellones, como en dinamismo vital, con visitantes de todos los países del mundo. Feria con múltiples facetas de lo que es el mundo industrial, pero con la ventaja de estar localizadas en un solo sitio y en una sola semana: tecnología, máquinas, marketing, publicidad, actividad comercial, gestión de ventas, profesionales de diversas edades y en diversas etapas de su vida profesional, y mucha camaradería. Me deslumbró. Imagino que cuando llamaba por teléfono a casa, en aquella época fijo, le contaría a mi madre la ilusión que me ocasionaba cada día, que podría ir desde lo magnífico del desayuno del hotel a la fiesta ofrecida a los exhibidores tras cerrar la feria.

Las máquinas en aquella época todavía eran mayoritariamente de color verde..., pero las personas que había junto a ellas eran de lo más colorido y empáticas. Uno de los hechos de los que me enorgullezco es que mis colegas más jóvenes sepan y tengan en sus agendas visitar esta feria como parte de su vida profesional y académica. Si uno o una se dedica a esto, hay que acudir; en dos o tres días se ve y se aprende lo que se puede ver en los dos años que transcurren entre sus ediciones. Si no se puede, la Bienal de Bilbao es también un buen escaparate, más cercano y sin el problema de costos, hoteles o viajes a Hannover.

En el ámbito del CIM, *Computer Integrated Manufacturing* [Yoram, 1983] se desarrollaron muchas ideas, desde la planificación de operaciones inteligentes, ideas como el *scheduling* dinámico, la planificación de recursos utilizando ordenadores, los MRP (*Manufacturing Resources Planning*), la gestión de procesos de evento discreto en tiempo quasi-real, el mantenimiento productivo total, el uso del CAM para programar las máquinas de Control Numérico, y otras. Los robots y los autómatas programables permitían “flexibilizar” la forma de producir, trabajando en células FMS con cierta autonomía. La filosofía y los objetivos del nuevo sistema productivo eran claros: permitir fabricar adaptándose a una demanda de productos finales cada vez más “customizados”. La figura 2 muestra el sistema piloto apoyado por IBM® en 1992 y ubicado en la Escuela de Ingeniería de Bilbao, compuesto de tres máquinas y dos robots que cargaban piezas y herramientas desde un sistema de transferencia.

Flexibilidad y productividad eran los dos objetivos a alcanzar sin comprometer una a la otra. En estos sistemas ya se adivinaba la necesidad de mayor nivel de conectividad y comunicaciones, que luego condujeron a la 4ª revolución industrial. Unos pocos años después el objetivo abarcó también la búsqueda de la calidad total, los cero defectos. Otros conceptos también propuestos como la *fabricación holónica* fueron más efímeros, siendo un holón un conjunto de elementos interrelacionados que permite la obtención de bienes mediante la combinación adecuada de los recursos necesarios; las ideas fueron absorbidas por nuevas filosofías como el *Lean Manufacturing* que es un concepto más transversal y aceptado. A finales del siglo XX y comienzos del siguiente, se mezclaron ideas puramente tecnológicas, casi siempre de origen europeo u occidental, con principios de organización de la producción de inspiración oriental.

El futuro se aceleraba y yo estaba ahí, era joven, y con un entorno industrial valiente para afrontar los retos de desarrollo tecnológico. Ya les he explicado que en este momento estaba emocionado, con ganas de trabajar y quizás mi único mérito fue aprovechar lo que otras personas, ingenieros, técnicos e industriales estaban promoviendo. Por suerte había maestros de los que aprender, que se habían esforzado en mantener y promover la excelencia en el conocimiento de procesos de fabricación y máquina herramienta. Gracias profesores, gracias compañeros de la universidad que habéis facilitado que seamos un grupo de calidad en procesos de fabricación. No cito nombres por

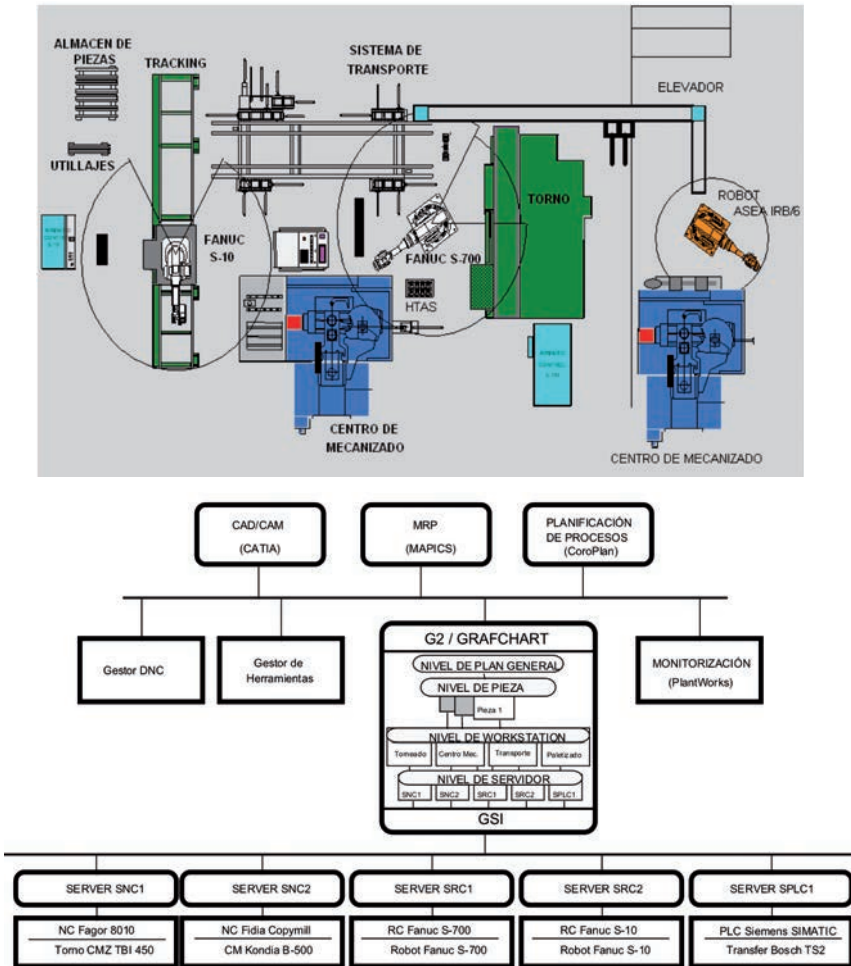


Figura 2: Izda. Planta del sistema CIM de la Escuela de Ingeniería de Bilbao.

Dcha. Módulos distribuidos dentro del nivel de célula, que operaban en una arquitectura cliente/servidor utilizando TCP/IP sobre redes Ethernet y Token Ring en los niveles superiores y una red Token Ring en los niveles inferiores.

riesgo a olvidar algunas personas que me ayudaron o fueron ejemplos a seguir.

Adelanto mis más sinceras gracias a todo el sector de máquina herramienta. Imagino que así, en genérico, es algo difuso, pero todas las personas implicadas se ven integrados en AFM clúster, Asociación española de máquina herramienta, perdón y mejor dicho..., asociación española que además también integra importadores, usuarios, startups, herramientas de mano. Incluso engloba universidades

o escuelas técnicas. El agradecimiento se extiende a la asociación SIF, Sociedad Española de Fabricación. ¡Cuánta buena gente! Hablaremos más de ellos y ellas en el apartado 13.

Abandono esta descripción de mis vivencias. Espero haberles transmitido mis emociones hacia este sector, pero es ya tiempo de hacer una reflexión sobre qué es la máquina herramienta y cuáles han sido algunos hitos en este campo de la técnica y sus principales aspectos tecnológicos.

3. ¿QUÉ ES UNA MÁQUINA HERRAMIENTA?

Me costaría encontrar quién fue el primer autor de esta definición tan clásica, “la máquina herramienta es aquella que puede fabricar a otras máquinas”. Se ha repetido mucho porque es muy cierta. En cada máquina de cualquier tipo que usemos, o sistema de transporte que elijamos, o en cada producto que utilicemos, en su fabricación o montaje se habrán utilizado una o varias máquinas herramienta.

Un clásico ejemplo que se ajusta a esta definición es la mandrinadora que John Wilkinson construyó en Inglaterra alrededor de 1775 para producir con precisión los cilindros para las máquinas de vapor patentadas por J.Watt (1776). Según su testimonio (en equivalente en sistema internacional) podía mecanizar cilindros de 145 cm de diámetro con una precisión tal que entre el émbolo y el cilindro no podía pasar una moneda de un chelín. Durante el siglo XIX surgieron otras mandrinadoras que permitieron mejorar fusiles y artillería. Por otra parte, en Gran Bretaña, Estados Unidos, Francia y otros países europeos nacieron en este mismo siglo casi todas las máquinas herramienta que hoy denominaríamos como convencionales; en aquellos tiempos se movían accionadas desde un eje central conectado a una máquina de vapor.

Éste es un buen momento para hacer honor en primer lugar, referencia en segundo, y así utilizar algunas de las fotografías del libro *Máquinas y hombres, Guía histórica* [Aldabaldetrecu y Ortuondo, 2000], editado por la Fundación Museo de Máquina herramienta. Editado en formato bilingüe castellano-euskera y con muchas secciones también en inglés, ha sido para mí una referencia y fuente de inspiración. Los que deseen conocer más de la historia universal de la máquina herramienta, y la particular de nuestro país, ésta es sin

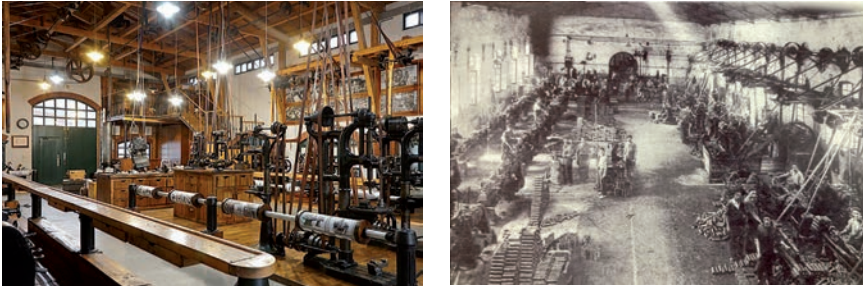


Figura 3: Izda. Museo de Máquina herramienta de Elgoibar (foto Iñaki Caperochipi)
Dcha. Taller de mecanizado de SAPA (SA Placencia de las Armas),
ambos en municipios de Guipúzcoa.

duda referencia clave y obligada. El título de este libro les explica que me inspiró parcialmente para elegir el título de mi discurso.

Pero éste no es un libro ni un discurso sobre historia, y para defender este argumento permítanme glosar un comentario de J. Richards en *American machinist* en 1899 (hace 125 años): “*no es probable que la historia de la máquina herramienta sea alguna vez escrita o publicada, al menos no de forma precisa e imparcial, el coste y tiempo requerido para recoger los hechos en un campo tan amplio lo impiden*”. En 1899 ya se consideraba una tarea titánica [Floud, 1975], imagínense en 2024.

Aprovecho para enseñarles dos fotografías (ver figura 3), la primera es una vista del museo de máquina herramienta ubicado en Elgoibar, donde se han cuidado y restaurado máquinas que fueron de importancia en el desarrollo de esta industria. La segunda es una vista de un taller de principios del siglo XX, de la empresa SAPA, empresa hoy día en buena salud y en funcionamiento y con un taller actual que no se parece en nada al de la fotografía salvo en lo laborioso. En el museo, todavía hoy las correas de cuero conectadas a un eje central permiten que las máquinas se muevan, mecanicen e incluso puedan producir componentes funcionales para repuestos o regalos de artesanía; en las máquinas modernas todos los movimientos de cabezales y ejes se producen por motores eléctricos independientes, y en algún caso por mecanismos hidráulicos.

Aprovecho ahora esta definición de la máquina herramienta “que puede fabricar otras” para abrir dos líneas de reflexión o discusión, muy propias del sector de la máquina herramienta.

En primer lugar, una discusión bastante filosófica es si “una máquina herramienta puede producir componentes más precisos que sí

misma". La respuesta, con alguna discusión intermedia, sería que seguramente no. De hecho, las máquinas de ultra precisión siempre requieren procesos donde la intervención humana en el ajuste final es clave, como puede ser el rasquetado y rectificación de guías. Es evidente que una máquina inducirá sus propios errores en la nueva máquina generada, además de los procedentes de otras fuentes de incertidumbre.

En segundo lugar, esta definición también enciende una luz sobre un hecho que puede ser clave para entender como promover y gestionar algunas ramas de la tecnología en un país como España. Si se desea que un país renueve sectores finalistas y que desarrollen productos o bienes de equipo de alta calidad y valor añadido, la adquisición de máquinas puede ser la vía de entrada y extensión de las nuevas ideas tecnológicas de una forma rápida y en múltiples sectores.

Mi opinión es que el sector de máquina herramienta conoce muy bien las necesidades de sus clientes. Así, las máquinas pueden incorporar nuevas funciones, que se ofrecerán a todos los potenciales usuarios. De esta forma, con la introducción de mejoras y avances en las máquinas se consigue un efecto multi-diana en sus sectores cliente. Una consecuencia inmediata es que si se financia el I+D de los fabricantes de máquinas y sistemas, probablemente existirá una mayor y más rápida extensión de la innovación tecnológica. En resumen, si se mejora la máquina de producción, esta permitirá más precisión y productividad, logrará anticiparse a errores de calidad, y el resultado es la mejora del producto final fabricado. Por tanto, la máquina herramienta es una tecnología clave habilitadora (KET, *Key Enable Technology*).

Vayamos a otra definición. Una máquina herramienta es un manipulador espacial servocontrolado de gran rigidez y precisión, que mueve una herramienta; esta actúa sobre un material para darle una forma final precisa. Esta definición se acerca de forma realista a lo que es la máquina herramienta en 2024.

Con esta definición, siempre se han definido en las máquinas los ejes, los grados de libertad del mecanismo del sistema. En este sector y en la forma de hablar del día a día, muchas veces se confunde el concepto de mecanismo con el de estructura, dado que el mecanismo además de permitir los movimientos debe soportar las cargas y minimizar las deformaciones inducidas por los procesos de fabri-

cación. No pidamos demasiado purismo a este sector, más propio de la asignatura Teoría de mecanismos y máquinas; en los talleres el realismo por un lado y su cercanía al concepto de oficio tradicional del “noble arte de trabajar metales” por otro, hace innecesario la precisión de los términos empleados. La precisión de los términos no importa, pero sí la precisión de la máquina y las consecuencias de ésta en el proceso que aplica. Mejorar la precisión es quizás el objetivo fundamental de la máquina herramienta en el presente siglo.

Los ejes o grados de libertad deben controlarse en velocidad y en posición, utilizando algoritmos de control de lazo cerrado. En las máquinas convencionales esta acción es responsabilidad del operario o radica en sencillos automatismos de naturaleza mecánica, bien sea utilizando levas o tornillos de transmisión. Pero desde los años 70 del siglo pasado, y hoy de forma generalizada, la sincronización de los ejes es la tarea principal del control numérico (CNC, *Computer Numerical Control*) del cual hablaremos en la sección 7.6.

Demos una tercera definición de máquina herramienta, la cual dice que es un tipo de máquina que permite dar forma a piezas sólidas, principalmente metales, con una alta precisión y productividad. La forma final de la pieza se consigue mediante la eliminación de una parte del material, que se puede realizar por arranque de viruta, o por estampado, corte, electroerosión u otros procesos especiales. Esta definición hace referencia al proceso de fabricación que la máquina herramienta aplica, y por tanto implica directamente a los usuarios de las máquinas, es decir, mecanizadores, estampadores, caldereros, a los que se suman soldadores, fabricantes de piezas en compuesto, y en los últimos quince años los aplicadores de fabricación aditiva en polímero o en metal. Sí, al final del discurso también mencionaremos la fabricación aditiva (sección 1.2).

No puedo dejar de reproducir la definición de la Enciclopedia Británica: “cualquier máquina estacionaria donde la conformación se logra de cuatro maneras generales: (1) cortando el exceso de material en forma de virutas de la pieza; (2) cortando el material; (3) conformando piezas metálicas hasta darles la forma deseada; y (4) aplicando electricidad, ultrasonidos o productos químicos corrosivos al material. La cuarta categoría cubre aquellas máquinas herramienta modernas y procesos para mecanizar metales ultraduros que no se pueden mecanizar con métodos más antiguos”. Nuestra hermana mayor la RAE es más escueta: “Máquina que por procedi-

mientos mecánicos hace funcionar una herramienta, sustituyendo el trabajo del operario”.

No me voy a olvidar la de nuestra Real Academia de Ingeniería: así, máquina-herramienta (con guion) “Máquina estacionaria con sistema propio de potencia, utilizada para: conformado, corte, torneado, mandrinado, taladrado, rectificado o pulido de piezas sólidas, especialmente metales”. Como se puede leer, es concisa pero intensa. Lo del guion y el plural, es siempre motivo de dudas y discusión por lo que consulté a Fundéu-RAE y la contestación fue “...es máquinas herramienta. No hay necesidad de guion, pero si se añadiera no cambiaría la formación del plural: máquinas-herramienta”.

Cada proceso de fabricación implica un tipo de máquina herramienta concreto. Y aquí aparece el binomio tecnológico por antonomasia para una producción exitosa: se debe disponer de: a) una máquina herramienta precisa, productiva y eficiente, pero b) también de un gran conocimiento del proceso de fabricación. Un proceso de fabricación eficiente implica tres niveles del saber: el conocimiento de la naturaleza del proceso desde un punto de vista físico-mecánico (la ciencia), la experiencia que da el oficio, y el dominio de las posibilidades que otorga la máquina y su control numérico.

Las máquinas herramienta de una empresa exitosa o fallida pueden ser las mismas. Lo que puede significar el éxito o fracaso es el mayor o menor conocimiento de su buen uso, y eso radica en las personas usuarias. De ahí que la expresión “el arte de trabajar metales” siga siendo vigente y expresando esa vertiente de arte y oficio tan desarrollado en nuestro país. Buena tecnología, conocimiento profundo, arte y experiencia son las claves del éxito.

Más adelante se establecerá una clasificación moderna del mundo de las máquinas herramienta (ver apartado 9), pero podríamos adelantar la siguiente, dado que se hace necesaria para seguir este discurso:

- Máquina de arranque de viruta. Este proceso utiliza una herramienta con filo definido, es decir, con una o varias cuchillas de corte; entonces el proceso se denomina mecanizado, aunque se usa también corte. La viruta es el elemento que se elimina, y es tan característico que da su nombre a este tipo de proceso.

En este grupo tradicionalmente hay dos tipos de máquinas y procesos: si el movimiento de corte se produce entre una pieza que gira y una herramienta que no lo hace, el proceso es torneado

- y la máquina es un torno. Si la herramienta es la que gira y la pieza no, el proceso es fresado, taladrado o roscado con macho.
- Si la herramienta actúa mediante un abrasivo, entonces el proceso es rectificado, o bien lapeado, bruñido o pulido. En estos casos el material se elimina como polvo o micro virutas. La máquina se denomina rectificadora en el primero de los procesos.
 - Máquina de deformación o corte de chapa. Este campo incluye prensas, punzadoras, plegadoras, y corte por láser y otros tipos.
 - Máquinas para procesos no convencionales. Hay varios, pero la electroerosión es el más conocido y utiliza descargas eléctricas en lugar de corte con herramienta.

La irrupción de máquinas multiteje y de máquinas multitarea ha implicado cambios en esta clasificación, y de ello hablaremos más adelante en el apartado 9.

En las grandes ferias de máquinas, como la EMO de Hannover o en la Bienal de máquina herramienta de Bilbao, entre un 60% a 70% del espacio lo ocupan las máquinas de mecanizado. Por tanto, merece hablar del desarrollo y estado actual de conocimiento de uno de los procesos más habituales, el mecanizado o arranque de viruta.

Existen otras ferias más dedicadas al campo de la deformación de chapa, como EuroBlech, que se celebra en Hannover también.

3.1 La solución global para un usuario

Los usuarios de las máquinas herramienta buscan soluciones a su problema de fabricación de componentes metálicos (o no) que permitan buena productividad y calidad final. Pero esta solución no solo implica una máquina, sino además otros elementos que son provistos por otras empresas. Por tanto, la solución completa es:

- Máquina herramienta, que a su vez integra muchos sistemas y equipos.
- Herramientas de corte, con múltiples empresas especializadas.
- Portaherramientas, que siguen unos estándares y son elementos claves en la precisión del proceso.
- Fijaciones para la pieza. Al igual que el punto anterior, las fijaciones son clave para alcanzar precisión, y evitar problemas de deformaciones en las piezas durante el proceso y vibraciones.

Además, la propia construcción de la máquina implica integrar equipos y elementos que son diseñados, fabricados y mejorados por otras empresas, entre ellos:

- La estructura y mecanismo general de la máquina, que es el principal elemento distintivo de un fabricante de máquinas.
- Las guías, motores y transmisiones de los accionamientos.
- El husillo principal de la máquina y su motor.
- Carenado de la máquina y sistemas de seguridad.
- El control numérico CNC, y las posibilidades de comunicaciones que este equipo ofrece.
- Sistemas de refrigeración mediante líquidos de corte, muchas veces llamados taladrinas. Extractores de viruta.
- Sistemas de cambio de herramientas y piezas, y coordinación con robots y almacenes auxiliares. El entorno de la máquina se ha automatizado en los últimos años (siguiendo la idea de célula de fabricación).
- Sensores y sistemas de supervisión del proceso.

Un fabricante de máquinas herramienta es un integrador de tecnologías, ofreciendo una máquina orientada a cumplir con las necesidades de un grupo de clientes. En su desarrollo intervienen muchos campos de la ingeniería.

En este momento se hace necesaria esta descripción, ya que estableceremos el estado del arte de los elementos citados en puntos su-

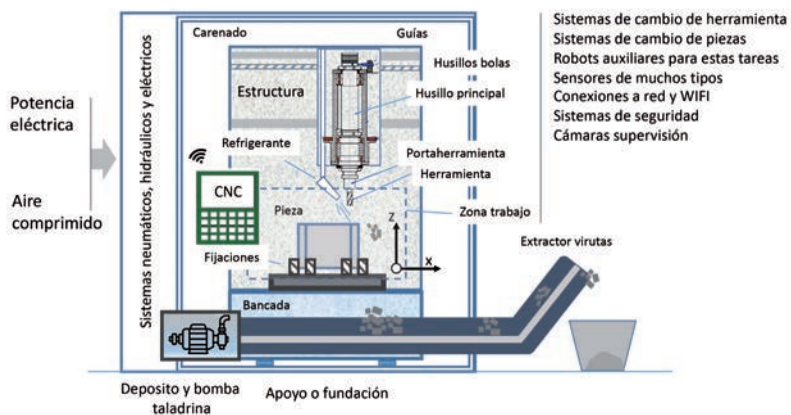


Figura 4: Esquema general de equipos, subsistemas y elementos de una solución de producción para un usuario. La máquina herramienta.

cesivos del discurso; la figura 4 intenta describir y ubicar cada elemento o sistema de una máquina herramienta y solución de producción genérica.

3.2 Fuentes de conocimiento

Los libros seguirán siendo un vehículo para la transmisión de conocimiento reposado y estructurado. Algunos de ellos han pasado a la historia como clásicos, ejemplos son el Boothroyd y Knighth [1989], Kalpajian y Schmid [2022], Klocke [2011], Weck [1984] y se seguirán utilizando si es que autores más jóvenes los actualizan. Es cierto que la forma de conseguir información hoy día, tan rápida y activa, ha causado que los libros pierdan algo de su protagonismo e incluso sus aires de leyenda. Este campo no es diferente a otras ramas del saber.

En relación a los principios tecnológicos que se utilizan en máquina herramienta y en sus procesos, los “journals” o revistas científicas más relacionados con la fabricación son:

- *Annals of the CIRP*, editados por esta prestigiosa asociación, de periodicidad anual, incorpora artículos sobre máquinas, mecanizado y otros procesos.
- *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, con unos de los impactos más altos en su categoría, sobre máquinas herramienta y procesos.
- *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, sobre procesos de fabricación.
- *International Journal of Manufacturing Science and Engineering. Transactions of the ASME*. Revista de alto impacto y elevado talante industrial de esta asociación americana de ingeniería mecánica.
- *Machining Science and Technology*, dirigida a los procesos de mecanizado.
- *Journal of Material Processing Technology*, una revista que incluye artículos sobre transformación de materiales, entre ellos los procesos de mecanizado y fabricación aditiva.
- *Proceedings of the British Institution of Mechanical Engineers. Part B: Manufacture*. De impacto medio, es un poco desigual en cuanto a la calidad de sus artículos.
- *International Journal of Production Research*, trata de producción en sentido amplio.

- *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. Incluye buenos trabajos sobre ingeniería y fabricación asistida por ordenador.
- *Journal of Intelligent Manufacturing*, centrada en avances en el uso de datos y software en procesos de fabricación.
- *Additive Manufacturing*, con ese título ya se puede saber a qué se dedica.
- *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, mantiene un buen nivel dentro de las revistas que han surgido en los últimos diez años.
- *Journal of Manufacturing Processes*, sobre procesos, y *Journal of Manufacturing Systems*, sobre sistemas de producción.
- *Computers in Industry*, revista dedicada a desarrollo de soluciones digitales en la industria.

La publicación de resultados de una investigación en una revista es un orden de magnitud en calidad muy superior a cualquier congreso. El ámbito del trabajo, el número de resultados, y la discusión crítica de los mismos es minuciosa. El acto de publicar es un medio de realizar buena investigación y poder intercambiar conocimientos, pero no el fin en sí mismo. El objetivo no puede ser otro que mejorar los procesos y máquinas para apoyar a los clientes y retornar la inversión previa realizada en investigación y desarrollo.

Las patentes pueden ser fuente de ideas, pero son de complejo seguimiento por parte de los profesionales. Por otra parte, el secreto industrial es clave en producción; por seguir un ejemplo clásico, si un inventor diese con la forma de convertir el plomo en oro...no lo publicaría, estaría en su casa o empresa haciéndolo sin dar noticia de ello.

No me puedo olvidar de los trabajos de divulgación que se publican en magazines, que en este sector diseminan mucha información técnica, aunque con un carácter más comercial.

Como sucede en muchas disciplinas, un buen técnico debe formarse con conocimiento clásico ya depurado en forma de libros, conocer las novedades por trabajos expuestos en magazines, interesarse por modelos y nuevos planteamientos adelantados en los journals, y estar atento a los nuevos contenidos en forma de videos, páginas web, etc. Quizás se haya perdido el respeto a los libros y su conocimiento bien estructurado, pero los videos, animaciones y nuevas for-

mas de comunicación que otorga internet..., yo creo que compensan la pérdida.

Las ferias técnico-comerciales son claves también en la formación, tanto de estudiantes como de los profesionales. El trato a los estudiantes debe cuidarse en estos entornos, de hecho, cada día se orientan más actividades hacia ellos y ellas para poder atraer su interés. Debo hacer honor a la Bienal de MH y seguramente con ello extenderlo a otras ferias, su dirección ha entendido que una feria puede tener múltiples objetivos y fomentar el interés de los jóvenes es uno de ellos. El tiempo otorgado a los jóvenes es una inversión a futuro.

No se puede olvidar aprender de los maestros, tanto en escuelas como en la propia empresa, y tanto en aspectos de la teoría como en trucos del oficio; no todo está en los libros, o si lo está es muy difícil de encontrar.

Esta mezcla diversa de fuentes del saber produce nerviosismo a espíritus muy científicos, pero no así a los ingenieros que siempre saben que el mundo real es complejo; saben que definir teóricamente dos planos paralelos es sencillo, ¡pero fabricarlos, imposible! Aprender y practicar la ingeniería es un equilibrio entre conocimiento, posibilismo, pericia y cierta valentía ante los retos.

4. LOS PROCESOS DE FABRICACIÓN, EL MECANIZADO

Muchas máquinas herramienta se dedican al mecanizado, o al *maquinado* como dicen nuestros compañeros en la ingeniería allende los mares. Se trata de un proceso de arranque de viruta donde la herramienta de corte posee un filo definido, y que aúna alta productividad y precisión. Si la herramienta es de tipo abrasivo estaríamos hablando de otro proceso clave para la máquina herramienta, que es el rectificado y que no abordaré.

Desde una perspectiva histórica, cortar, arrancar material es inherente al uso de herramientas por los seres humanos, empezando por las primeras cuchillas de la prehistoria africana de los modos olduvayense (modo 1) y achelense (modo 2). Evidentemente el arranque de viruta existía desde tiempos inmemoriales, pero no fue hasta el siglo XIX y por empuje de la revolución industrial que se extendió y pasó a ser un oficio, un arte y posteriormente en el siglo XX una tecnología de fabricación basada en principios físicos, una ciencia aplicada.

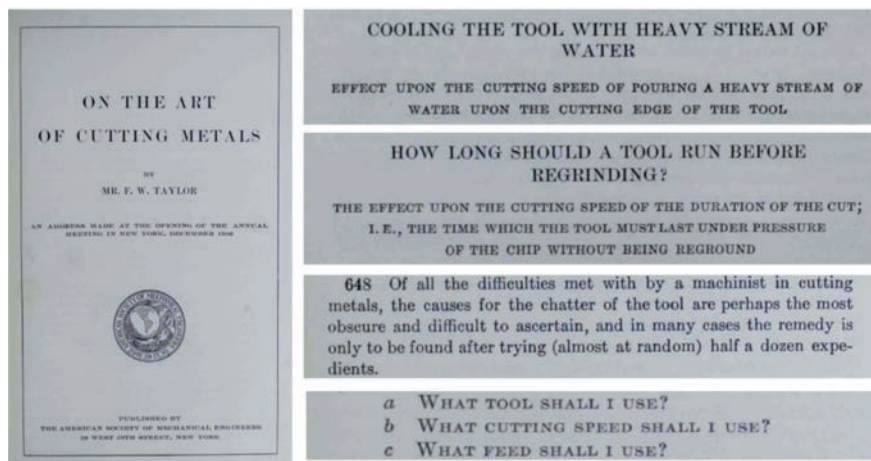


Figura 5: El discurso de toma de posesión de F.W. como presidente de ASME: On the art of cutting metals (1907).

Un ingeniero clave fue Frederick Winslow Taylor (20 de marzo 1856 - 21 de marzo 1915) ingeniero mecánico estadounidense. Fue y es muy conocido por sus métodos para mejorar la eficiencia industrial [Taylor, 1911]. Sus trabajos pioneros en la aplicación de principios de ingeniería en la fábrica fueron fundamentales en la creación y el desarrollo de la rama de la ingeniería que actualmente se conoce como ingeniería industrial.

Pero en el campo del mecanizado su trabajo clave fue su discurso en la toma de posesión como presidente de ASME (*American Society of Mechanical Engineers*), la conferencia *On the Art of Cutting Metals* (1907), que en portada y algunas frases muestro en la Figura 5. Previamente hizo fortuna patentando mejoras en el proceso siderúrgico para obtener el acero de herramientas, también denominado HSS (*High Speed Steel*). Este tipo de acero aleado con tungsteno (wolframio) permitía duplicar e incluso cuadruplicar la velocidad de corte, y fue el rey de las herramientas hasta la aparición del carburo de wolframio sinterizado con cobalto, denominado metal duro. Todavía hoy el acero rápido es muy usado en brocas, machos de roscar y fresas madre.

Taylor además dedujo la relación entre la velocidad de corte y el desgaste de la herramienta. El desgaste afecta muy negativamente la calidad e integridad de la superficie, la productividad y el costo. El modelo más utilizado para el análisis de la vida útil de las herra-

mientas es el propuesto por Taylor hace más de un siglo y se recoge en la ecuación 4.1:

$$\frac{v_c}{v_r} = \left(\frac{T_r}{T}\right)^n \quad v_c \cdot T^n = v_r \cdot T_r^n \quad (4.1)$$

donde:

n es una constante para cada material y herramienta.

v_c es la velocidad de corte.

T es la duración de la herramienta.

v_r es la velocidad de referencia para la que se sabe que la duración de la herramienta es T_r .

Me temo que mi presente discurso no llega ni a ser un divertimento simple comparado con el discurso del padre del mecanizado, y de su planteamiento basado en elementos empíricos. Y no me atrevería a no volver a apuntar que en 1911 publicó su famoso *The Principles of Scientific Management* [Taylor, 1911], el taylorismo es elemento clave en la segunda revolución industrial.

Recojo en la figura 6 junto a Taylor algunas de las personalidades relevantes tanto en el campo de desarrollo de las máquinas herramienta, como de la teoría y práctica del mecanizado. Habría muchos más, pero los que se muestran fueron realmente claves. H. Maudslay ideó un torno para cortar metal, alrededor de 1800, permitió la fabricación de tamaños de rosca de tornillo estándar, y fue maestro de otros ilustres inventores de máquinas. Eli Whitney fue precursor de la fresadora, P.Huré ideó un cabezal universal aún hoy muy utilizado, el profesor M.Weck recogió enciclopédicamente el conocimiento de máquinas en el siglo pasado. Los expertos de la segunda fila serán mencionados más adelante.

Hoy día, el coste por hora de las modernas máquinas suele llevar a planteamientos productivos para maximizar la productividad. Por tanto, usar intensivamente la capacidad de las máquinas, incluso a costa de acelerar el desgaste de la herramienta, es el objetivo. El coste por hora de una máquina en una industria española suele ser elevado. La obtención de las curvas de Taylor implica muchos ensayos, o bien captar información del proceso industrial real de forma muy sistematizada, tal como hizo el mismo Taylor en su empresa. El método de Taylor sigue realizándose por parte de los productores de aceros y aleaciones metálicas para ca-



Figura 6: Honor a los que desarrollaron máquinas y componentes (arriba) y la ciencia del mecanizado (abajo) Henry Maudslay (1771-183), Eli Whitney (1765-1825), Philippe Huré (1846-1934), Manfred Weck (1927-2023), FW Taylor (1856-1915), E.W. Merchant (1913-2005), J. Tlustý (1921-2001), Yusuf Altıntaş (1953-).

racterizar la maquinabilidad de sus materiales (pero no de las herramientas). Pero en el día a día del mecanizador, donde a) la oferta y especialización de las herramientas de corte crece, b) la competencia es enorme, y c) donde surgen centenares de nuevas herramientas por año, el cálculo detallado de las curvas de Taylor sería inviable.

Por este motivo se hace necesario un método más rápido, en la línea de la mejora continua. Uno de ellos es el propuesto por A. Fernández [Fernandez-Valdivielso, 2023] consistente de dos campañas de ensayos, una primera que compara herramientas de varios fabricantes ante un ensayo común y determina las principales pautas de desgaste o vida de herramienta, y una segunda fase donde solo dos o tres compiten teniendo como criterio final el posible daño o afectación a la integridad superficial. Este método permite en dos o tres meses tener resultados que pueden utilizarse en producción real, mejorando productividad y calidad. El esquema de trabajo se muestra en la figura 7.

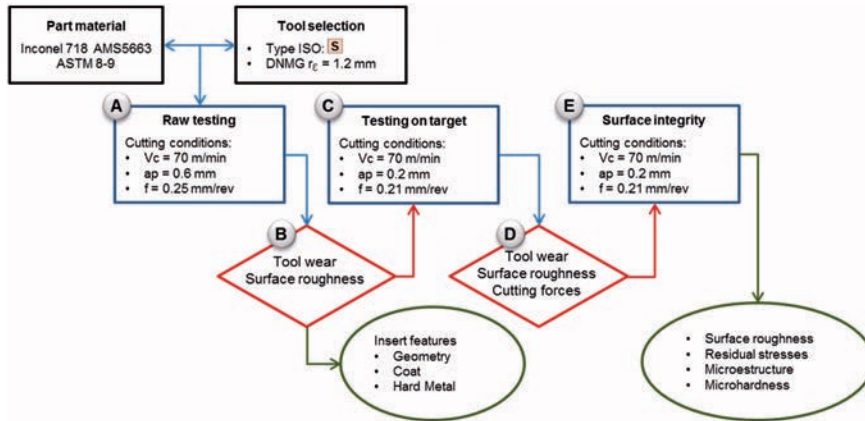


Figura 7: Método propuesto por A. Fernández [2023] para ensayos de mejora continua en mecanizado, aplicado al torneado de Inconel 718 para turbinas aeronáuticas. B y D son las etapas de discusión y filtrado de resultados.

Durante el pasado siglo se desarrolló la teoría y se propusieron modelos del proceso de corte y arranque de viruta, pasando el mecanizado de ser considerado un arte a una ciencia aplicada. Modelizar es clave, una imagen vale más que mil palabras, pero un modelo cuenta toda la historia. Así, una definición moderna [López de Lacalle et al., 2009] podría ser que el mecanizado es un proceso sustractivo de fabricación donde se elimina material mediante el avance de una herramienta de corte aguda y afilada dentro del mismo, y se produce de esta forma un intenso fenómeno de deformación visco-plástica muy rápido. La viruta es claramente el resultado de la deformación.

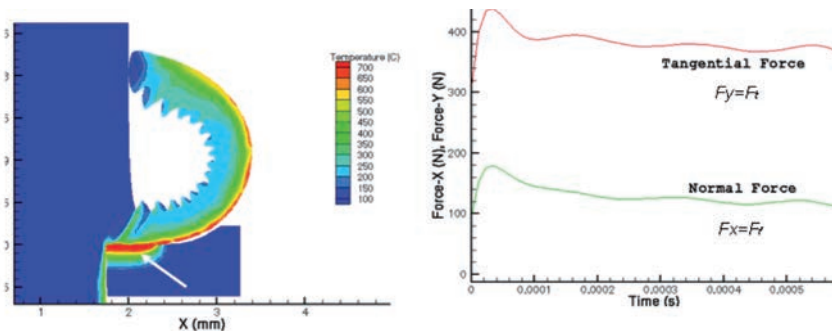


Figura 8: Izda. Campo térmico en torneado de acero a 900 m/min y avance 0,102 mm/rev. Dcha. Fuerza de corte (tangencial) y fuerza de avance (normal). Simulación por elementos finitos en ambos casos.

El proceso conlleva una gran generación de calor debido a la transformación de la energía plástica en calor (ver figura 8), a lo que se suma una elevada fricción en varias caras del filo de corte. La velocidad de deformación se sitúa en el orden de magnitud de 10^5 s^{-1} , y las temperaturas pueden ser tan elevadas que aceleran la degradación del filo de corte.

El calor es el enemigo número uno de las herramientas de corte, dado que casi todos los fenómenos de degradación físico-metalúrgica suelen caracterizarse por ecuaciones que tienen la temperatura en el exponente. Por ello refrigerar la zona de corte es clave, mediante emulsiones y fluidos base agua-aceite (tala-drina), o bien aceite puro. El proceso de corte también implica mucha fuerza sobre el filo, pero su efecto sobre el desgaste y degradación es más lineal. La figura 8 muestra el campo térmico y fuerzas de corte simuladas por elementos finitos; como se puede observar existen zonas de la herramienta que alcanzan más de $700 \text{ }^\circ\text{C}$.

La ciencia y la tecnología de los procesos de mecanizado convencionales han avanzado mucho desde la obra fundamental datada en los 1940s del Dr. E.Merchant [Merchant, 1944]. Este ingeniero perfeccionó la mecánica del corte de metales, que dio origen a los modelos de plano o zona de cizalladura. Tras este trabajo, profesores como Oxley [Oxley, 1989], Armarego [Armarego, 1969] propusieron nuevos avances. Este esfuerzo de modelización suele denominarse analítico y es un campo clásico, aunque actualmente ya no es objeto de grandes esfuerzos de investigación.

A finales de los 1950s y 60s, Tobias [Tobias, 1965] desarrolló la teoría básica del *chatter* o vibración regenerativa, para establecer las condiciones de estabilidad dinámica de los procesos. Sobre este tema han trabajado numerosos investigadores, destacando J.Tlusty [Tlusty, 1999] y Y.Altintas, [Altintas, 2000], con lo que ya hemos introducido a las personas de la segunda fila de la figura 6.

En la actualidad preponderan dos tipos de modelización, la mecánica y la numérica, que sustituyen, mejoran, completan o hacen más útiles los modelos de tipo analítico. La forma de plantear un modelo mecánico para las tres componentes diferenciales de la fuerza de corte (F_t , F_r , F_a) responde a la ecuación 4.2.

$$\begin{aligned}
 dF_t &= K_{t_c}(t_n, Z) \cdot t_n^{m_t} \cdot db + K_{t_e} \cdot dS \\
 dF_r &= K_{r_c}(t_n, Z) \cdot t_n^{m_r} \cdot db + K_{r_e} \cdot dS \\
 dF_a &= K_{a_c}(t_n, Z) \cdot t_n^{m_a} \cdot db + K_{a_e} \cdot dS
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

El modelado mecánico es un enfoque semiempírico que combina: a) un modelado preciso de la cinemática del proceso de mecanizado, y por tanto utiliza la sección de viruta sin deformar (t_n) y longitud de filo comprometida (dS), con b) coeficientes de fuerza determinados experimentalmente (K) que describen la interacción de la herramienta/pieza-material de trabajo en cuanto a resistencia a la cizalladura y fricción.

Los modelos mecánico tratan de predecir las consecuencias del mecanizado de interés práctico, como son las fuerzas y desde ahí las deformaciones de herramienta/pieza de trabajo. Altintas y Budak [Altintas y Budak, 1995] han demostrado que los coeficientes de fuerza específicos (K) pueden relacionarse directamente con el ángulo del plano de cizallamiento, el ángulo de fricción y la resistencia media al cizallamiento del material que se está cortando. Los coeficientes pueden obtenerse mediante simples pruebas de corte ortogonal u oblicuo. El libro del Profesor Altintas de la British Columbia [Altintas, 2000] ha sido fundamental para establecer y dar a conocer este tipo de modelos, y explicar cómo los mismos pueden utilizarse en la modelización de vibraciones auto excitadas del mecanizado, es decir, *el chatter*.

La aplicación de los modelos mecánicos a procesos de fresado [Altintas, 2000], [Lamikiz, 2003], taladrado [Rivero, 2011], torneado [Urbikain, 2014], [Gonzalo, 2013] cuenta con gran madurez. Son además piezas fundamentales de modelos en el campo del chatter, donde me atrevería a decir que contamos en España con un gran número de expertos, como es el caso del Dr J. Muñoa [Muñoa, 2016], Dr. X. Beudaert [Beudaert et al., 2002], Dr. J.J. Zulaika, o Dr. G. Urbikain. En el campo internacional ya existe algún software comercial, como Cutpro[®] o Machpro[®], que son programas de análisis de mecanizado que predicen fuerzas en fresado, taladrado, torneado, mandrinado y roscado, y predicen las posibles vibraciones durante el proceso. También tiene módulos de análisis modal, adquisición de datos y diseño del husillo principal de las máquinas; tienden a in-

cluir un simulador de las trayectorias de la herramienta durante el mecanizado que predice fuerzas, par, potencia y dinámica en cada punto de la pieza mecanizada.

Respecto a la modelización numérica, en los últimos 30 años se han desarrollado modelos basados en elementos finitos [Van Luttervelt et al., 1998], [Arrazola et al., 2013 y 2014]. La introducción de nuevas formulaciones Lagrangianas y ALE (*Arbitrary Lagrangian-Eulerian*) y el aumento de la potencia de cálculo de los ordenadores, han permitido realizar cálculos en casos de corte oblicuo que implican modelos tridimensionales. Los procedimientos de solución pueden utilizar dos formulaciones de integración temporal diferente, a saber, implícita y explícita. Sin embargo, el cálculo del campo de tensiones y temperaturas en la herramienta y la superficie de la pieza requiere todavía tiempos de cálculo elevados.

Por otra parte, para modelizar numéricamente es necesario conocer la ecuación constitutiva del material, esto es, la relación entre tensión de fluencia, deformación, velocidad de deformación y temperatura. Estos datos son de difícil obtención dado que las velocidades de deformación en el mecanizado son más elevadas que las correspondientes a los ensayos de deformación con barra Hopkinson (SHPB, *Split Hopkinson Pressure Bar*) que llega a velocidades moderadas (hasta 10^4 s⁻¹). Si no se conoce correctamente esta ecuación del material, los métodos MEF pueden dar resultados que no se ajustan a la realidad. El modelo de ajuste del material más utilizado es el Johnson and Cook [1983]. Por último, debe indicarse lo complejo de captar datos experimentales para verificar la modelización: son magnitudes con grandes gradientes en anchuras de viruta menores al milímetro, virutas que se interponen con los instrumentos, necesidad de calibración de numerosos parámetros, entre otros problemas de los muchos que se pueden citar. A ellos se añade que muchos procesos utilizan fluidos de refrigeración que se desparraman por la zona de corte, dificultando tanto la acción de sensores como dispositivos ópticos.

Los sistemas de simulación por elementos finitos están algo lejos de la actividad industrial diaria. En investigación se utilizan para definir hipótesis o discutir resultados. Reconozcámoslo, simplemente que una pieza esté amarrada con un apriete distinto a la anterior pieza, o que la herramienta sufra un desgaste no uniforme, o que las lanzas de lubricación no se coloquen bien, estos factores pueden ha-

cer que los resultados cuantitativos difieran de los predichos. Así el mecanizado es un caso distinto a los procesos de deformación de chapa, donde los softwares de simulación son ya hoy parte de la producción real. Los dos programas de elementos finitos más utilizados para analizar la formación de viruta son AdvantEdge® de Third Wave Systems, y Deform® de Scientific Forming Tech, o soluciones propuestas por los investigadores utilizando MEF comerciales.

En la literatura también se aplican nuevas ideas, como métodos sin malla [Markopulos et al., 2020], *Smooth particle hydrodynamics* (SPH) [Wang et al., 2019], *Finite pointset method* (FPM) [Uhlmann et al., 2021], *Constrained natural element method* (CNEM) [Rodríguez-Prieto, 2013], métodos de los elementos discretos [Jiang et al., 2020], dinámica molecular [Liu et al., 2021], y seguramente otros. Siempre que haya, a) un problema complejo y éste es el caso del mecanizado, b) un novedoso método de resolución, y c) un investigador curioso, ahí seguro que habrá un buen intento. Los avances en modelización se van recogiendo en la ediciones de la conferencia CIRP *Conference on modelling of machining operations* [Melkote et al., 2022].

La utilidad de estos métodos en el día a día industrial..., esa quizás se haga más esperar, dado que los trucos del oficio son tan importantes o más que los principios científicos de los procesos. Pero somos ingenieros, queremos saber, modelizar y obtener datos útiles para nuestras aplicaciones..., no nos rendimos; cada tesis doctoral y modelo implica conocer mejor el proceso.

4.1 Herramientas de corte

Las herramientas de corte representan un mercado enorme, con una previsión de 30.750-50.000 millones de euros para 2027 y crecimiento de 3,9% anual, siempre están en evolución constante. La tendencia es especializarse en operaciones y materiales de pieza concretos, ofreciendo una herramienta específica para cada operación.

Hay varios materiales para fabricarlas, entre ellos destacó el denominado acero rápido (*High-speed Steel*, HSS), desarrollado con participación de Taylor. Actualmente, el centro de gravedad del gran universo de útiles de corte es el conocido como “metal duro”, que es un material compuesto donde la partícula dura es carburo de wolframio (WC) de tamaño menor a 1 micrómetro, que se sinteriza con

cobalto hasta en un 12%. En el día a día se le denomina metal duro, carburo cementado o carburo sinterizado.

A las herramientas de metal duro, tras ser conformadas, sinterizadas y afiladas, se les suele dotar de un recubrimiento o película de menos de 10 micrómetros de espesor, de gran dureza y estabilidad térmica [Fernández de Larrinoa, 2015]. El AlTiN es un buen ejemplo de recubrimiento moderno, aunque hay muchísimos disponibles. A la combinación de material constitutivo más recubrimiento se le denomina de forma habitual como *grado* o *calidad* de una herramienta. Los recubrimientos aportan resistencia a la fricción, un coeficiente de rozamiento reducido y una barrera térmica efectiva, algunas herramientas recubiertas se muestran en la figura 9. El recubrimiento es muy competitivo en precio, suele ser entre el 5-10% del coste de la herramienta de metal duro, y es aplicable a herramientas no solo de metal duro.

Como alternativa y en algunas aplicaciones se utilizan las herramientas cerámicas basadas en alúmina (Al_2O_3) o nitruro de silicio (Si_3N_4). Y en algunas aplicaciones el diamante poli-cristalino (PCD) y el nitruro de boro cúbico poli-cristalino (PCBN), pero en estos dos últimos casos su coste es muy elevado. Pero el metal duro sigue siendo el que mejor compromiso dureza-tenacidad presenta, ofreciendo una buena vida útil de los filos de corte.

La clasificación ISO 513:2012 (*Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges- Designation of the main groups and groups of application*) clasifica los grados o calidades del metal duro en función de "para lo que sirven". Divide el mundo de las herramientas de corte en función de los materiales a los que están destinadas. En la versión vigente hay 6 familias, cada una de ellas definidas con una letra y color, P (azul), M (amarillo), K (roja), N (verde), H (gris) y S (naranja) seguidos de un número que describe el compromiso entre dureza y tenacidad. Un grado de metal duro depende del tamaño de grano del WC y del porcentaje del conglomerante (habitualmente cobalto), y de la posibilidad de que se utilicen pequeñas cantidades de otros carburos como los de titanio o tantalio. Sin embargo, esta información no se suministra al usuario y no aparece en la norma ISO.

Existe una relación casi biunívoca entre herramienta y material de pieza, por lo que para el mecanizador el material de sus piezas también se puede clasificar con estas letras y colores, de forma adi-

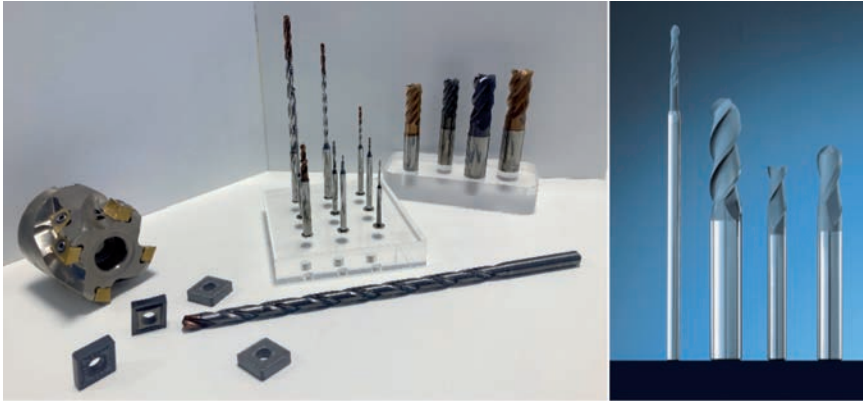


Figura 9: Izda. Herramientas de corte diversas para superlaciones base níquel del motor aeronáutico. Dcha. Herramientas de metal duro recubiertas.

cional a la que proviene de la ciencia de materiales para las aleaciones metálicas. Me atrevería a decir que, de forma poética, las aleaciones metálicas a trabajar son mayormente grisáceas, pero el mecanizador las representa y ubica en su espacio del conocimiento por bonitos y alegres colores.

Sobre la tecnología de aplicación de los recubrimientos, indicar que es un campo en auge dentro de la ingeniería de materiales y superficies. Las dos principales tecnologías son el CVD (*Chemical Vapor Deposition*) y el PVD (*Physical Vapor Deposition*). No es el objetivo de este discurso explicarlos, ver [Fdz. de Larrinoa, 2015], sin embargo es interesante resaltar que una importante diferencia entre ambos métodos radica en la temperatura a la que se debe llegar para recubrir la herramienta. En el caso del CVD es superior a 600 °C, lo que puede tener consecuencias para la integridad del material base. En el caso PVD la temperatura es inferior.

Con las herramientas actuales, hoy día se puede arrancar viruta de aleaciones y aceros endurecidos hasta 64 HRC de dureza, incluso un poco más. En campos de aplicación como el de aceros templados, que hasta finales del siglo pasado parecían cerrados al mecanizado, hoy día el fresado es la opción principal.

La vida de una herramienta está directamente relacionada con su desgaste. La figura 10 muestra algunos tipos de desgaste observables en el filo de corte, descritos según las normas ISO: *ISO 3685-1993 Tool life testing with single point turning tools*, *ISO 8688-1-1989: Tool life testing in milling Part 1: face milling*, *Parte 2 End milling*. El

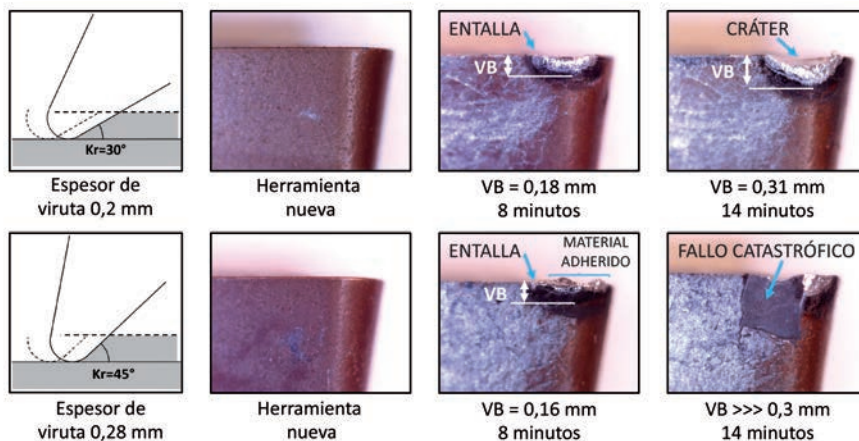


Figura 10: Torneado de Inconel 718 con herramienta de alto avance V_c 50 m/min, f 0,4 mm/rev, a_p 0,5 mm. Mismas condiciones con distinto ángulo de ataque (K) 30° y 45°. El mayor espesor de viruta en el segundo caso (abajo) ocasiona la rotura del filo (desgaste según norma ISO 3685-1993).

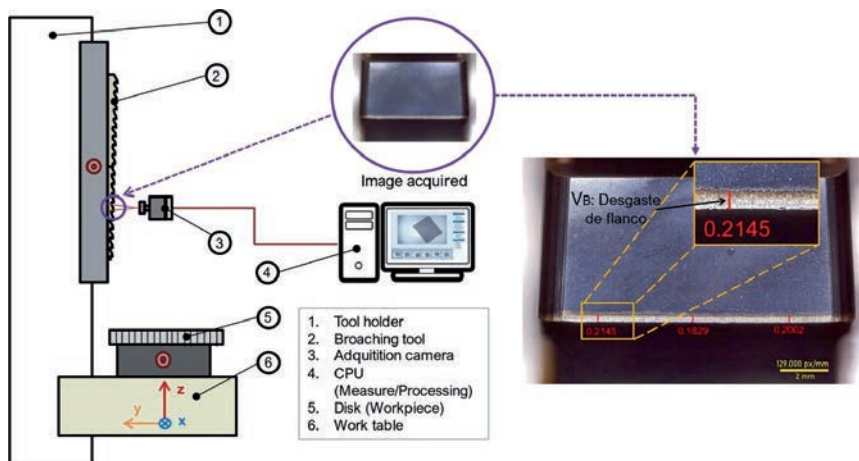


Figura 11: Sistema automático basado en visión artificial y sensores para medida de desgaste de los dientes de las brochas que producen los “firtree” (colas de milano) de turbinas aeronáuticas, en el CFAA [Aldekoa et al. 2023].

tipo de desgaste que se controla en la industria es el *desgaste de flanco* (VB), pérdida gradual de material del filo que se produce en el flanco o superficie de incidencia y que provoca el progresivo desarrollo de una zona de desgaste de flanco. Ésta es la medida de control habitual porque: a) puede medirse, b) implica disminución de la dimen-

sión de la herramienta, y c) por tanto produce imprecisión en la pieza producida.

En los talleres actuales, el desgaste se mide mediante lupa por parte del operario, lo que obliga a éste a parar el proceso y extraer la herramienta de corte, además de la propia subjetividad de la medida. Sin embargo, es inminente la irrupción de sistemas de visión artificial que permitan obtener el desgaste in situ y de forma muy rápida. Otro acercamiento es inferir el desgaste de señales obtenidas de la máquina y proceso [Aldekoa et al., 2023], [Holgado et al., 2023], como puede ser el consumo de potencia o del par de los motores, y mostrado en la figura 11 para un proceso de brochado de colas de milano (*firtrees*) de discos de turbina.

4.2 Portaherramientas

El interface o unión entre las herramientas de corte y la máquina son los portaherramientas. Estos deben estandarizar su conexión al husillo principal de la máquina, por una parte, y asegurar que la herramienta quede sólidamente atrapada en el “porta” durante la operación de mecanizado por la otra. Los últimos años han visto la introducción de diversos estándares de mayor o menor éxito en el mercado.

Los portaherramientas se consideran elementos de elevada precisión y se producen en acero de gran calidad. Los aspectos claves de un correcto portaherramientas son:

- Rigidez y estabilidad dinámica, dado que los “portas” deben soportar los esfuerzos de corte, que implican fuerzas variables y provocan deformaciones que son fuente de incertidumbre.
- Estandarización, dado que son elemento de unión entre la herramienta con la parte invariante de la máquina herramienta.
- Precisión, porque implican que el filo de corte esté en el lugar deseado. La herramienta define su acción por el denominado TCP (*Tool Centre Point*) que se utilizará para la programación de las operaciones. Por ejemplo, en los portas de herramientas rotativas, el descentramiento o *runout* es un aspecto clave en el balance de incertidumbre (ver figura 12).

En el proceso de torneado los portaherramientas son más sencillos, dominando el familiarmente denominado “cuadradillo”, que se amarra a las torretas mediante tornillos. También se utiliza el co-

necto trigonal, similar al abajo explicado. El portaherramientas en torneado contribuye a la definición espacial de los ángulos de corte de la herramienta en el proceso. También existen portas que cuentan con un elemento intermedio dotado de un eje dentado para ser amarrado en torretas de tornos de control numérico (conocidos como conectores VDI).

En fresado, en lo relativo a la estandarización de la conexión con el husillo, podemos destacar varios sistemas:

1. Morse (ISO 296:1991), sistema cónico muy utilizado en el vástago de brocas helicoidales y escariadores, y en los contrapuntos de los tornos. Es antiguo y podría considerarse tendente al desuso.
2. Tipo cónico y sólido, como el Caterpillar o CAT (DIN 69871 / DIN ISO 7388-1), o el SK (DIN 69871 / DIN ISO 7388-1), el BT (MAS 403 / JIS B 6339 / DIN ISO 7388-2) o el DIN 2080 también llamado ISO. El mango macho de forma cónica encaja en el encaje hembra (husillo), que tiene un cono correspondiente de igual ángulo. Existen versiones con la brida ajustada a doble contacto, es decir, que al contacto en la parte cónica se añade su apoyo en el plano de la nariz del husillo. Se utilizan normalmente en fresadoras convencionales (manuales), o con rotaciones menores a 6.000 rpm.
3. HSK (del alemán *Hohlschaftkegel*) 50, 63, o 100, (también conocidos como DIN 69893 / ISO 12164), se utilizan principalmente en centros de mecanizado CNC de alta velocidad, particularmente aquellos con velocidades de husillo superiores a 10.000 rpm. Los conos HSK se desarrollaron en Alemania y se han extendido rápidamente por su excelente rendimiento en aplicaciones de mecanizado de alta velocidad. El vástago hueco de HSK es deliberadamente delgado y flexible, por lo que se expande más que el husillo y se aprieta contra la pared interior del acoplamiento del husillo cuando gira a alta velocidad. Existen seis formas de mango HSK, en nueve tamaños.
4. Sistema trigonal bajo estándar ISO 26623-1:2020 *Polygonal taper interface with flange contact surface*. Este sistema fue desarrollado para el cambio rápido por Sandvik® (Capto™), pero además se ha mostrado muy eficaz en máquinas multitarea que para torner deben bloquear el cabezal; la forma trigonal es óptima para soportar el par torsor.

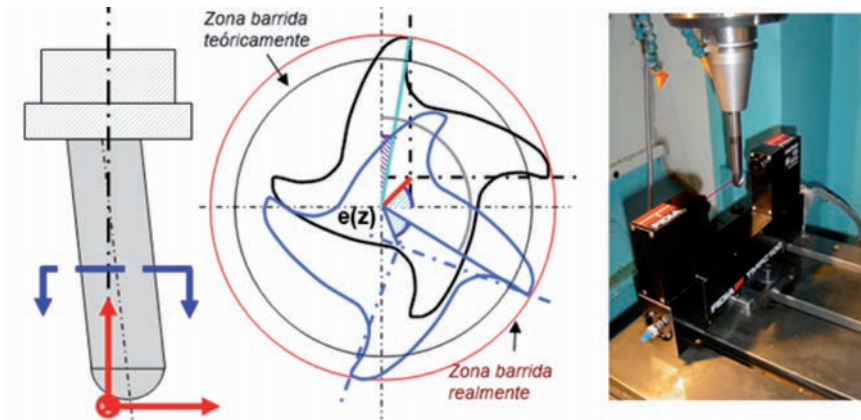


Figura 12: El concepto de descentramiento o runout es clave en herramienta rotativa: fresas, brocas y machos de roscar. Un caso de fresa de cuatro dientes, y su control por láser realizado en la universidad del País Vasco en 2005.

En todos los casos, la talla o tamaño del portaherramientas se define por un valor relacionado con el diámetro en el extremo mayor del cono truncado, o de la brida. A mayor diámetro, se soporta mayor par y se puede transmitir más potencia.

En lo referente a cómo fijar la herramienta de corte en el porta, los sistemas de unión son:

- Pinza y rosca de apriete. La pinza puede ser cónica o cilíndrica. Esta última produce un mejor alineamiento y una presión constante, siendo habitualmente denominada como de *gran apriete*, ver figura 13.
- Sistemas mecánicos, como el mango Weldon (una cara plana en el cilindro que será bloqueada por un tornillo de frente plano), pero lo podríamos considerar algo primitivo en la industria moderna.
- De amarre hidráulico. Permite una presión grande y constante a lo largo del mango de las herramientas. Cada diámetro requiere un portaherramientas distinto, y con el tiempo la presión de aceite disminuye debido a las fugas.
- Amarre por interferencia geométrica, o ajuste con amarre térmico. Es un proceso de zunchado donde se calienta el portaherramientas y se introduce la herramienta. Tras el enfriamiento se consigue la mejor de las alineaciones y gran presión. Cada diámetro requiere un portaherramientas, lo que hace a este sistema costoso. Sin embargo, se consigue una excentricidad menor a 3 μm .



Figura 13: Portaherramientas o “cono”, en este caso HSK 63 de gran apriete con pinza cilíndrica.

Los portaherramientas significan una gran inversión para una empresa. La selección del sistema estándar de conexión porta-husillo es clave, y en menor medida de los sistemas de apriete de las herramientas-porta, que sí pueden convivir. Por ser un ejemplo, en el Centro de Fabricación Avanzada Aeronáutica CFAA trabajamos con HSK 100 para operaciones rotativas, y trigonal C6 y C8 para operaciones de torneado; disponemos de amarre mecánico por pinza, hidráulico y térmico. La figura 14 muestra una variedad de los portaherramientas disponibles.

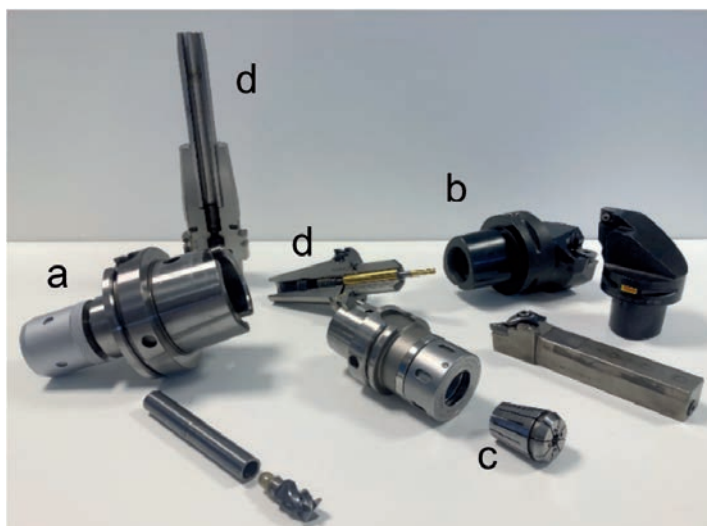


Figura 14: Algunos portaherramientas utilizados en el Centro de Fabricación Avanzada Aeronáutica CFAA: a) HSK100, b) Capto™ (trigonal) C8, c) amarre por pinza cónica, d) amarre térmico.

4.3 Sujeción de pieza

Si la fijación de herramienta presenta muchas y diversas soluciones, la sujeción de la pieza a la mesa de la máquina es aún más diversa. Los principios a aplicar son los clásicos de la mecánica de precisión, y repetidos en muchos libros, entre ellos el *Precision Engineering* de A.Slocum [Slocum, 1989]: a) existe un número mínimo de puntos que fijan la posición (situación isostática), b) se comienza a restringir más grados de libertad siempre pensando en el autoequilibrado, y c) finalmente se llega a una solución altamente hiperestática, de gran rigidez y por tanto seguridad.

Las garras o contactos actúan por fuerza normal y a este efecto se suma la fricción, que en algunos casos puede ser muy elevada. La hiperestaticidad conlleva el riesgo de deformaciones inducidas por exceso de fuerza en los amarres, es decir errores de forma inducidos en las piezas. Así, en componentes delgados, cuando un componente se suelta de amarres, puede sufrir deformación debido a las tensiones residuales previas o inducidas por el mecanizado [Kurnadi et al., 2007]. Por otra parte, el amortiguamiento ofrecido por las fijaciones actúa siempre en contra de las vibraciones del proceso de mecanizado, bien aquellas que se originan por el golpeo intermitente de los dientes de la herramienta y su amplificación dinámica, o bien por vibraciones autoexcitadas [Kumadi et al., 2007].

En torneado existen dos grandes conceptos y soluciones de amarre:

- _ En tornos horizontales son habituales los platos de garras que buscan el autocentrado. Suelen ser de tres garras interconectadas a través de un engranaje de desplazamiento. A este amarre se puede sumar el apoyo de la pieza en el otro extremo en un punto del contrapunto, y si la pieza es compleja y larga se usan apoyos intermedios denominados lunetas. En las máquinas multitarea actuales el contrapunto o punto giratorio puede sustituirse por otro plato de garras, que puede ayudar a arrastrar la pieza, o trabajar en otro componente distinto. Las garras pueden estar fabricadas en aceros no templados (blandas) para adaptarse a la forma cilíndrica con más facilidad y no marcar las piezas, o pueden ser templadas (duras).
- _ Sistemas de amarre sobre las ranuras de los platos, solución común en tornos verticales donde las piezas tienen gran diámetro

y muchas de ellas son huecas. Pueden ser fijaciones mecánicas o hidráulicas. Se ha observado que pueden imponer condiciones de restricción hiperestáticas a los componentes, algunos de ellos muy flexibles como las carcasas de turbomaquinaria, y por tanto pueden inducir errores al soltar las piezas de los amarres.

En fresado existen muchas soluciones (ver figura 15), entre ellas:

- Mordazas de apriete, bien por tornillo o presión hidráulica. Se prefieren los topes positivos a la fricción para asegurar la pieza. Para procesos automatizados de gran volumen, los accesorios de fresado suelen incluir abrazaderas y garras hidráulicas o neumáticas.
- Sistemas magnéticos: las piezas se pueden colocar de forma plana sobre las mesas magnéticas. El hecho permite acceder fácilmente a todos los lados de la pieza, excepto la base de apoyo.
- Sistemas de cambio rápido y de punto cero: sistemas modulares de cambio de pallets que permiten un cambio muy rápido y preciso de piezas de trabajo en los centros de mecanizado modernos.
- Las mesas de vacío: sujetan piezas planas o ligeramente curvadas por la succión de ventosas. Son típicas en piezas delgadas y mecanizado ligero, es decir, donde la fuerza de corte es baja.
- Los centros de mecanizados horizontales, muy típicos en mecanizado de componentes de automoción, utilizan las *tombstones* (lápidas), es decir, placas de acero que se montan sobre los pallets para enfrentar las piezas al husillo. Los *pallets* metálicos (acero inoxidable) se mueven por la acción de un sistema de transferencia.
- Se han probado algunas soluciones con adhesivos, bien con plásticos termoestables (FGrip de Fresmak©), o con resinas que curan con luz ultravioleta (Blue Photon©), o con pastas que ayudan a las mordazas de torno (Molykote® P-1042). Es una solución posible pero poco utilizada. El cambio de fase sólido-líquido de un material, inducido mediante la aplicación de alguna fuente de energía (por ejemplo, calor, luz, presión distribuida, campos químicos, magnéticos, etc.) es conocido como “encapsulación” [Gameros et al., 2017]. La encapsulación se realiza con componentes pequeños e intrincados de paredes delgadas que pueden deformarse o dañarse bajo una fuerza de sujeción, o que

son difíciles de sujetar con un accesorio tradicional. Un medio extendido son las aleaciones de bajo punto de fusión, que se basan en bismuto aleado con antimonio, cadmio, plomo, estaño, galio y/o indio y tienen una larga historia de uso como fijaciones en la industria.

- La adhesión mediante una fina película de agua se puede utilizar en fabricación con fuerzas de proceso reducidas, que son casos muy singulares.

Existen sistemas modulares que permiten conformar una solución de fijación para varias piezas complejas. Sin embargo, en aplicaciones de elevado tamaño (aeronáutica, eólica) o de gran valor añadido (aeroturbinas, prótesis) es habitual la *ingeniería de diseño de utillajes*. A estos utillajes muchas veces se les denomina “hierros”; evidentemente reducir la complejidad, aumentar la versatilidad de uso de los sistemas de amarre, y añadir sensorización para comprobar que la fijación es correcta han sido, son y serán fruto de muchos proyectos de ingeniería.

No es la primera vez que algún estudiante recién llegado a una empresa pide información sobre algún libro sobre amarres, la contestación siempre es: sentido común y conocimiento de los conceptos de isostaticidad e hiperstaticidad.

En la figura 15 se presentan cuatro mordazas, la primera es una clásica de accionamiento por tornillo y cierre hidráulico, la segunda es un nuevo diseño de amarre sensorizado y con comunicación inalámbrica, un utillaje para carcasas, y por último un sistema de cambio rápido y punto cero.



Figura 15: a) Mordaza Fresmak® Arnold. b) El Block-SC 4.0 amarre sensorizado y monitorizado detecta de manera inalámbrica y precisa la correcta posición del utillaje de sujeción y la presión que del sistema. c) Sistema flexible de Innoclamp®. d) Sistema de cambio rápido y punto cero de Stark®.

5. REQUISITOS QUE DEBE CUMPLIR UNA MÁQUINA HERRAMIENTA

Como en el caso de otros bienes de equipo, los diseñadores de máquinas herramienta consideran los requisitos y necesidades de los usuarios como su principal dato de entrada. La necesidad y función conducen a la definición de las características principales de las máquinas, que se describen en los catálogos comerciales de las mismas.

Los usuarios pueden ser, o bien clientes no específicos pero incluidos en sectores típicos con requisitos comunes, o un cliente individual con especificaciones muy definidas. Así en el primer caso, las máquinas de tamaño pequeño y mediano suelen fabricarse pensando en clientes hipotéticos, ofreciendo una oferta de opciones en el catálogo. Por el contrario, las máquinas grandes suelen diseñarse bajo pedido e incluso licitación y concurso. Aun así, en este segundo caso el fabricante de máquinas sí se basa en una serie de plataformas básicas sobre las que construir la solución. En general casi ninguna empresa de máquina herramienta parte de cero con cada pedido y cliente, sería actuar en contra de una estrategia comercial de especialización en sectores concretos donde se suelen repetir las necesidades de un cliente a otro. Por este motivo es muy importante trabajar y tener referencias en sectores tractores, dado que la necesidad de una empresa tractora se repetirá en las empresas de su cadena de suministro y en empresas similares de su competencia.

Otro aspecto a tener en cuenta es a qué se dedicará la máquina en función de los tamaños de lotes y el sector finalista. Así una máquina destinada a mecanizar carcasas de ordenadores portátiles y elementos similares estará haciendo lo mismo 5 años trabajando 7 días a la semana y 24 horas al día. En cambio, una gran máquina vendida a un taller generalista mecanizará piezas distintas a lo largo de su vida útil. La amortización del equipo dependerá de este horizonte temporal e intensidad de uso.

En cualquier caso, los requisitos están relacionados con los siguientes aspectos que surgen de las necesidades de los clientes potenciales.

Tamaño máximo de pieza a mecanizar

Generalmente es necesario mecanizar en cada punto de la pieza, por lo que el espacio de trabajo de una máquina debe ser mayor que el tamaño de la pieza. Sin embargo, en algunas máquinas se realizan modificaciones para poder alojar piezas mayores que el espacio de trabajo, por ejemplo, en los tornos de bancada móvil, donde el diámetro máximo de giro es mayor que el diámetro máximo de trabajo. Pero lo habitual es que la pieza está dentro del espacio de trabajo de la máquina.

En el sector de automoción los componentes no son grandes, y se suelen colocar varios en cada fijación para ser mecanizados. En el extremo en cuanto a zona de trabajo están las máquinas que trabajan sobre componentes de energía eólica (bujes, carcasas de multiplicadoras, bridas) o hélices de barco, a modo de ejemplo.

Geometría principal de la pieza

La forma global de la pieza a producir es un punto clave para seleccionar el tipo de máquina necesaria. Si la pieza es cilíndrica, el torno es la primera opción a considerar. Si es prismática, un centro de fresado puede ser la más adecuada. Sólo en algunos casos puede haber dudas, a la luz de las capacidades de los nuevos centros de fresado de cinco ejes provistos de mesas con ejes giratorios de alto par, que pueden realizar operaciones de torneado además de fresado.

El segundo aspecto geométrico a tener en cuenta es el número y la complejidad de los detalles. Si los detalles son pocos y sencillos, no contribuyen a aumentar la complejidad, y no obligarán a incluir más grados de libertad en la máquina que se va a utilizar. Por el contrario, si son numerosos y/o muy complejos, la máquina herramienta debe ser estructuralmente mucho más compleja. Un ejemplo de este último caso son los centros de fresado de cinco ejes, en los que se añaden dos ejes de orientación a la estructura de máquina cartesiana básica de tres ejes, lo que permite mecanizar todas las caras en una sola fijación. Otro ejemplo son los llamados “centros de torneado”; en este caso, las herramientas de fresado se integran en la torreta de un torno para poder realizar detalles como ranuras de chaveta, caras poligonales o planos inclinados, y añadiendo al mismo tiempo grados de libertad adicionales al torno, como la rotación controlada

del eje C y el movimiento lineal del eje Y fuera del plano habitual de los tornos (plano XZ).

Por último, se hablaría de las máquinas multitarea, a las que nos referiremos más adelante en el apartado 9, dado que consiste en un cambio profundo en la forma de entender el universo de las máquinas herramienta.

Precisión y/o Velocidad de arranque de material

En algunas aplicaciones, el énfasis es la precisión, pero en otras puede preponderar conseguir alta productividad. Cuando se habla de precisión, la mente piensa en “máquinas de acabado”, en las que el movimiento principal no requiere un par y una potencia elevados porque la sección de viruta es pequeña y por tanto la fuerza de corte es reducida. En estas máquinas se recomiendan transmisiones de precisión, una estructura de la máquina con alta rigidez y amortiguación, y un control estricto de la trayectoria de la herramienta.

En cambio, cuando se hace énfasis en productividad, se piensa en una “máquina robusta”, preparada para trabajos pesados (*heavy duty*), con un motor principal de alto par y potencia.

Precisión y productividad podrían parecer contradictorias, pero por lo general los usuarios requieren una máquina adecuada para varias aplicaciones, exigiendo simultáneamente que sea “suficientemente precisa” y “altamente productiva”, al precio más bajo. Éste es el patrón básico en la oferta de la mayoría de las fresadoras y tornos actuales, aunque cada sector y aplicación acentúa más un objetivo u otro.

Precisión

Es una palabra muy utilizada que implica dos conceptos diferentes: exactitud y repetibilidad. La *exactitud* es la capacidad de dar en el blanco respecto a una especificación o dato a conseguir, cuantificada por el sesgo o diferencia entre el resultado obtenido y el deseado.

Pero la repetibilidad es la capacidad de alcanzar el mismo valor de forma continuada. Por tanto, una máquina podría ser muy repetitiva pero inexacta, o poco repetitiva pero más exacta.

Un concepto relacionado es la *resolución*, la diferencia más pequeña entre dos valores consecutivos que pueden distinguir los dispositivos de medición. Hoy día la resolución no es un problema para

la precisión de las máquinas. Por ejemplo, en los centros de mecanizado actuales se incorporan *encoders* lineales de $0,01 \mu\text{m}$ de resolución para cerrar los lazos de posición de los ejes; para cerrar los lazos de motores rotativos se dispone de *encoders* de hasta 16 millones de pulsos por revolución. Con estas cifras, la precisión y la repetibilidad de la máquina herramienta (que se mide en la desviación en la posición de la punta de la herramienta o TCP (*Tool Center Point*)) son valores más altos que la resolución, es decir, la resolución no es el limitador. También puede hablarse de *resolución de la máquina*, como la separación alcanzable entre dos posiciones consecutivas en el espacio de trabajo; está afectada por el comportamiento estructural del conjunto y los sistemas de control y medida.

En general sufrir una baja repetibilidad es complejo de resolver, dado que no se puede corregir por acciones de control. Por el contrario, la falta de exactitud podría llegar a corregirse si se llega a pre-determinar el error sistemático. La baja repetibilidad implica por el contrario una mayor incertidumbre.

Tomemos el siguiente ejemplo, el diámetro de un orificio específico debe medirse a lo largo de una serie de piezas. Así, el diámetro medido debe compararse con el valor nominal. En la figura 16 se presentan dos posibles resultados de la medición. En la parte superior de la figura, se representan los valores de medición, en la parte inferior se calcula la función estadística de densidad.

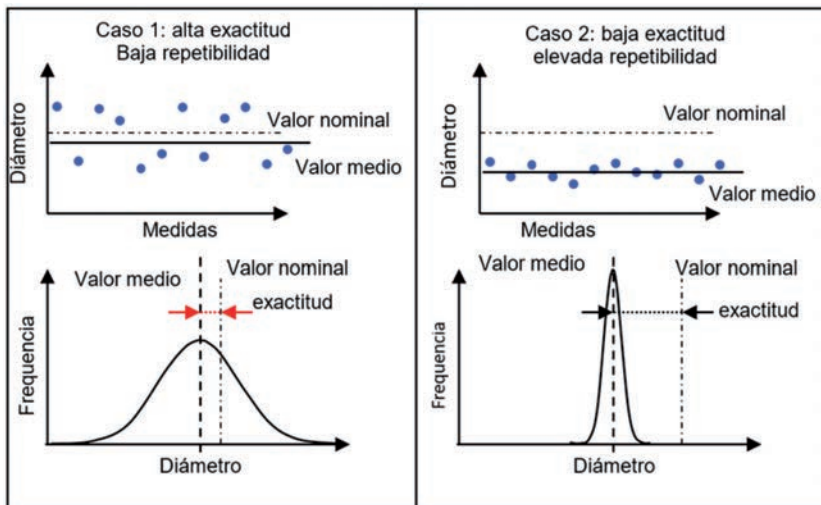


Figura 16: Dos casos extremos de exactitud y repetibilidad.

El primer caso implica un conjunto de mediciones de alta exactitud y baja repetibilidad. Como se observa, cada medida presenta desviación con respecto al valor nominal; sin embargo, el valor medio de la medición está muy cerca del valor nominal. Por otro lado, el segundo caso representa una serie de medidas cuya desviación del valor medio respecto del valor nominal es mayor. Sin embargo, todas las medidas presentan valores muy cercanos a este valor medio, es decir, la dispersión de las medidas es mucho menor. Por lo tanto, es un caso con menor exactitud pero mayor repetibilidad.

En ingeniería, cuando se habla de precisión se hace más referencia a la repetibilidad que a la exactitud; pero en el lenguaje común existe una gran ambigüedad. En este punto reivindicar el papel de la metrología en todo el campo de la fabricación; la metrología, que estudia y trata de cuantificar la incertidumbre, que es propia e inherente a nuestra observación de la naturaleza. Simplemente recordar que un buen metrólogo solo podría afirmar algo muy parecido al dilema cartesiano, “mido luego existo, de lo demás, tengo incertidumbre”. El apartado 12 se dedicará a la metrología.

La exactitud y precisión son los principales objetivos de los constructores de máquinas herramienta en nuestro país. Las directrices y metodologías para el diseño y montaje de máquinas, la fabricación de elementos de máquina, los procedimientos de ensayo y el uso de sistemas auxiliares se inspiran en este requisito [Dornfeld y Lee, 2008], [Evans, 1989]. Conseguir una alta precisión es muy costoso, requiere identificar, controlar y reducir todas las fuentes de error. De ahí que para alcanzar un determinado grado de precisión se requiera un cuidadoso estudio [Hocken, 1980]:

- Del efecto de los errores de montaje de los componentes móviles de la máquina sobre la posición de la herramienta [Hsu y Wang, 2007]. Las buenas prácticas de montaje, el ajuste preciso de los carros a las guías y la medición de los errores después del montaje son las técnicas básicas para reducir este efecto.
- Deformaciones de la estructura y herramienta bajo la acción de las fuerzas de corte y de inercia. La acción de las fuerzas de corte siempre deforma herramienta y máquina [Lamikiz et al., 2009].
- El comportamiento dinámico del sistema bajo la excitación de las fuerzas de corte, ya que la mayoría de las operaciones de mecanizado producen fuerzas muy variables. Un elevado nivel

- de amortiguación en la estructura y articulaciones de la máquina permiten reducir las vibraciones.
- Efectos de fricción y holgura en las guías, y en los sistemas de transmisión de los accionamientos.
 - Indeformabilidad frente al calentamiento por fuentes térmicas. En las máquinas herramienta existen cinco fuentes de calor: el motor-husillo principal, los motores de accionamiento, el proceso, el material retirado en forma de viruta, y por último los cambios de temperatura del taller. Los problemas térmicos son muy complejos, dado que estimar la magnitud de calor solamente puede realizarse de forma aproximada. A este punto dedicaremos el apartado 7.2
 - Control de la trayectoria de la herramienta. Pueden producirse errores en la forma y dimensiones de la pieza si se programan cambios de dirección bruscos en el movimiento de la herramienta. Los CNC modernos ofrecen funciones de suavizado para reducir estos errores.

Una imagen muy ilustrativa sobre la precisión en el mecanizado fue dada por McKeown [McKeown, 1987] después de las ideas de los 1970s de Taniguchi [Taniguchi, 1974 y 1983]. Taniguchi fue uno de los primeros en utilizar el término nanotecnología. Como se muestra en la figura 17, según esta predicción en los últimos sesenta años se habría alcanzado una precisión de $1\ \mu\text{m}$ para el mecanizado convencional, mientras que en ultraprecisión se habría conseguido una centésima de micrómetro en algunos casos. Evidentemente, estas buenas cifras se situarían en el segmento de las máquinas de alta gama. Resulta ilustrativa la comparación con la mandrinadora de J.Wilkinson de 1775 que reiteramos aquí, “que mandrina con un error de espesor de un chelín en un diámetro de cincuenta y siete pulgadas” (espesor 2 mm aproximadamente).

Tras analizar el estado del arte en 2024, la predicción anterior era demasiado optimista. Un nivel de precisión más realista a fecha actual definiría la precisión como aquella que alcanza 10^{-5} la magnitud principal del componente. Es decir, una centésima de milímetro en un metro. Como se deduce de esta definición, la precisión suele referirse siempre en relación al tamaño de lo fabricado.

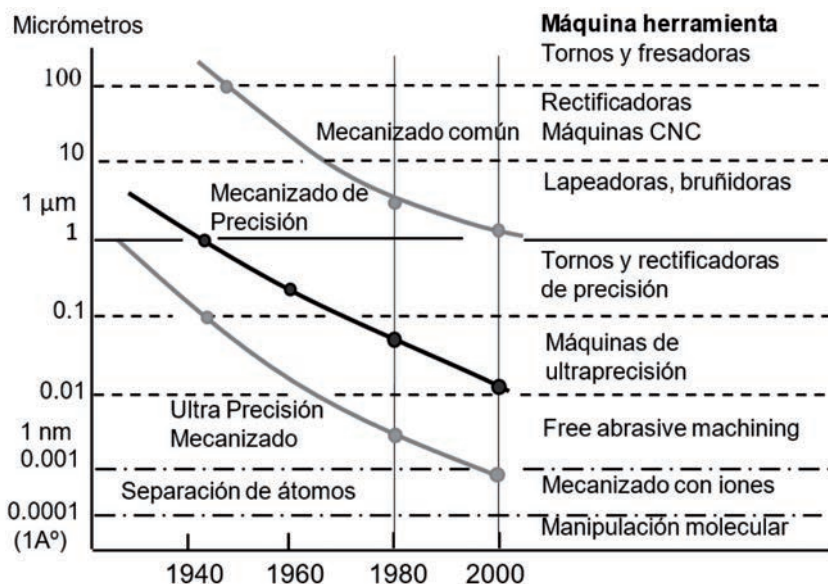


Figura 17: La famosa curva de evolución de la precisión, de McKeown y Taniguchi.

Otros factores

Otros factores relacionados con los requisitos del cliente son:

- Comportamiento cinemático, es decir, velocidad y aceleración. En relación con la velocidad, este requisito se refiere a la necesidad de “movimientos en vacío” rápidos entre operaciones de mecanizado sucesivas y en el cambio de herramientas. En algunas aplicaciones este requisito no es tan importante, algunas máquinas suelen realizar pocas operaciones pero largas en tiempo en piezas únicas, mientras que otras realizan muchas operaciones cortas en cada pieza de un gran lote y la velocidad es importante. Un ejemplo del primer caso es el centro de fresado de gran tamaño para el acabado de matrices de estampación. Un ejemplo del segundo caso relativo a máquinas rápidas son los centros de mecanizado para piezas de fundición de hierro o aluminio para el automóvil, donde son muy recomendables los movimientos en vacío muy rápidos.
- La aceleración no es requisito directo del usuario; pero el ingeniero mecánico debe considerarla al diseñar una máquina, ya que la fuerza de inercia está relacionada con la aceleración por

la segunda ley de Newton. La aceleración es un aspecto importante en el fresado de superficies esculpidas [Salgado, 2005], ya que la herramienta debe cambiar constantemente de trayectoria. La agilidad de la máquina depende en gran medida de las aceleraciones de los ejes. Lo mismo puede decirse de las máquinas para componentes de automoción, donde la herramienta debe moverse rápidamente entre los múltiples puntos de mecanizado y debe acelerar/decelerar de forma muy brusca. En todo caso, una aceleración entre 1 y 2 g define el orden de magnitud de las máquinas comerciales más ágiles que se construyen actualmente.

- El tamaño del lote influye en el nivel de automatización de las máquinas herramienta y en el uso de dispositivos auxiliares. Una máquina CNC universal puede procesar piezas diferentes. De una pieza a otra distinta solo debe ejecutar otro programa CNC y con una carga de herramientas adecuada sería viable la producción de una pieza diferente. Por el contrario, una línea transfer ofrece una alta tasa de producción para una pieza específica, pero necesita mucho tiempo para adaptar las estaciones y los sistemas de transferencia a las nuevas piezas. El término “automatización dura” hace referencia a la instalación de herramientas y dispositivos especiales para la manipulación y el mecanizado de piezas específicas, mientras que la “automatización blanda” se refiere al uso de máquinas CNC con útiles universales y cambio automático de herramientas; en los catálogos de máquinas se abrevia para el cambio de herramientas como ATC (*Automated Tool Changer*) y para piezas APC (*Automated Piece Changer*). Flexibilidad y productividad siempre son conceptos en competencia en el diseño y construcción de las máquinas.
- El precio es un factor importante; de forma aproximada depende del tamaño de la máquina en proporción lineal, y de la precisión de la máquina en relación exponencial. Hoy día, el concepto de “Coste de Vida” incluye las etapas de la vida de la máquina, esto es la inversión inicial, los costes de mantenimiento, los costes fijos y los costes de reciclado de la máquina. También debe indicarse que hay un mercado muy activo de maquinaria de segunda mano o de ocasión.
- El servicio técnico y respuesta ante averías es clave en muchos clientes a la hora de decidir una compra.

- Apoyo al usuario. Las aplicaciones, *gadgets*, o sistemas de asistencia al operario por parte del control cuentan cada día más en la decisión de compra. En el campo de las grandes máquinas el cliente sigue pidiendo pruebas de mecanizado concretas, siendo los resultados el principal elemento de decisión. Sin embargo, los compradores y los operarios no son inmunes a funciones que seducen a los clientes y que por tanto deben cuidarse. En general los avances en los denominados HMI (*Human Machine Interfaces*) son más lentos que en otros campos técnicos, pero continuos.

En la actualidad, el impacto medioambiental de las propias máquinas herramienta no es un factor decisivo; sin embargo, el de su proceso (mecanizado u otro) empieza a serlo. Sería de esperar que cada vez sea más importante en la decisión de compra. El sector de mecanizado claramente tiene bien definido su problema, que no es otro que mecanizar con más precisión y productividad: si no se alcanzan los micrómetros o el número de piezas por hora, tu empresa enfilará la senda de cerrar. Pero el sector de máquina herramienta sabe anticiparse a demandas sociales y ya existe una norma al respecto, ISO 14955-1:2017 *Machine tools. Environmental evaluation of machine tools. Part 1: Design methodology for energy-efficient machine tools*. Por ellos hablaremos de la sostenibilidad en la sección 14.2

6. PRECISIÓN EN EL PROCESO, MÁS ALLÁ DE LA MÁQUINA

La incertidumbre de la máquina es crucial en la precisión, pero si además se incorporan los efectos de la herramienta, el posicionamiento de la pieza en la mesa de la máquina y los errores del proceso se puede definir la incertidumbre final y acumulada en la pieza fabricada. La incertidumbre debida al operario se introduce en la fase de *setup* o fijación de piezas a la mesa de la máquina, y de las herramientas a sus portas.

Los valores típicos para la incertidumbre estimada en los casos de una máquina de fresado convencional y de una microfresadora (de ultraprecisión) se recopilan en la tabla 1, con unos valores estimados en 2007 [Uriarte et al., 2007] y en [Diaz-Tena et al., 2013]. Así, considerando las fuentes de incertidumbre como independientes, la incertidumbre estándar combinada (u_c) y por lo tanto la incerti-

dumbre expandida (U) con un 97% de confianza ($k=2$) se calculan respectivamente como:

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^N |u(x_i)|^2 \quad (6.1)$$

$$U = 2 \cdot u_c \quad (6.2)$$

Para un centro de mecanizado con control numérico, los valores totales de incertidumbre acumulada pueden rondar los 10-40 μm , que se reflejarán en la precisión de la pieza. Por otro lado, la incertidumbre global para máquinas herramienta de precisión (por ejemplo, en una configuración de fresadora) es de 4 a 6 μm , pero si se consideran los errores de alineación y referencia, la incertidumbre aumentaría a 7,5 μm . Estos son valores típicos, muchos talleres y empresas trabajan en disminuir estas horquillas y lo consiguen. En la tabla 1 se puede observar la relevancia de cada fuente de incertidumbre.

Respecto a la caracterización y mitigación de cada fuente de incertidumbre, se deben abordar de forma distinta. Cada una de ellas representa uno de los problemas actuales de la producción de máquinas herramienta, que se destacarán en los apartados 7 y 8.

Actuando sobre: a) todas las fuentes de incertidumbre de forma simultánea, b) con nuevas formas de medida en máquina y puesta en referencia de la pieza, y c) utilizando máquinas rígidas, podríamos pensar que la incertidumbre actual en un taller moderno y con aire acondicionado roza la centésima del milímetro (10 μm). Éste puede ser el caso de varias empresas ubicadas en muchas regiones de España. Incluso hay mecanizadores que rebajan este valor por diez y se han especializado en ultraprecisión porque trabajan para instrumentación científica, espejos, y otros campos de enorme valor añadido.

Hablando de forma general, tras el esfuerzo de investigación y desarrollo de los últimos cuarenta años se ha reducido radicalmente la incertidumbre en el componente final fabricado, y por tanto su precisión ha aumentado. Este hecho permite que los diseñadores definan tolerancias más estrechas en los productos finales. La menor incertidumbre y su mayor precisión asociada es percibida por el usuario como una mayor fiabilidad en los productos finales; sin embargo, la mayor complejidad y mayor número de funciones de muchos automóviles, máquinas, electrodomésticos, e incluso políticas de obsolescencia programada aplicadas en algunos sectores, esconden

TABLA 1. INCERTIDUMBRE EN EL PROCESO GLOBAL DE MECANIZADO, PARA UNA FRESADORA DE TAMAÑO COMÚN, Y UNA MICRO FRESADORA DE PRECISIÓN

	Centro de escala convencional	Centro de micro mecanizado	Acciones de reducción
Incertidumbre en la posición de la máquina debida a errores cinemáticos	1,5 a 2,5 μm	0,1 a 0,15 μm	Ver apartado 7.1 de este discurso
Incertidumbre debida a expansión/contracción térmica de la máquina	3-6 μm	Menor de 0,5 μm	Ver apartado 7.3
Incertidumbre en el posicionamiento del portaherramientas (descentramiento)	3-15 μm	1-2,5 μm	Ver apartado 4.2
Incertidumbre en los errores de trayectoria debidos al control	2-3,5 μm	—	Ver apartado 7.6
Incertidumbre debida a deformación de herramienta ante fuerzas de corte	5 a 20 μm (operaciones de acabado)	1 a 1,5 μm	Ver ref. [Salgado, 2005]
Incertidumbre debida a alineamiento de pieza en la mesa de la máquina, o puesta en cero	2-5 μm	Menor a 2,5 μm	Ver 4.3 Utilizar sondas en máquina y sistemas de ajuste tipo <i>best fitting</i> ¹

esta mejora y hacen olvidar el hecho de que la precisión ha mejorado en los últimos cuarenta años a pasos agigantados. El usuario se acostumbra a lo bueno y lo mejor, y suele olvidar (o es muy joven) que hace cuarenta años las cosas se fabricaban peor.

¹ Ajuste del bloque de partida a la geometría teórica a mecanizar.

7. LA MÁQUINA HERRAMIENTA EN 2024

Repasemos los principales conceptos que definen una máquina herramienta moderna, que se ubique en el segmento de elevadas prestaciones. Este nicho de mercado es donde sin duda deben situarse y se sitúan los fabricantes nacionales de estos bienes de equipo. Por tanto, este apartado trata de presentar el estado del arte de una máquina “tipo”, similar a una producida en España.

7.1 Estructura-mecanismo

Las máquinas herramienta son mecanismos espaciales con varios grados de libertad (denominados ejes) que producen un movimiento relativo de mecanizado entre herramienta y pieza, y con espacio de trabajo suficiente para albergar la pieza de trabajo. Estos mecanismos deben ser muy rígidos y precisos, por lo que su comportamiento estructural y resistente es clave. Los conceptos de configuración cinemática y puramente estructural están indisolublemente unidos en este sistema.

Considerando las máquinas como mecanismos espaciales, se utilizan cinemáticas *en serie*, dotadas de ejes lineales y rotativos. Pongamos como ejemplo el fresado y las fresadoras de 5 ejes. La primera pregunta es ¿por qué cinco ejes? Una fresa de corte es cilíndrica, y un cilindro en el espacio implica cinco coordenadas generalizadas para definir su posición. Por tanto, si se desea que la herramienta de corte pueda moverse con una orientación controlada respecto a la superficie de la pieza, el manipulador que la mueve debe disponer de 5 grados de libertad, tres lineales y dos rotatorios o de orientación. Los grados de libertad de orientación se pueden distribuir en el componente terminal que agarra la herramienta, en la parte que amarra la pieza, o en ambos. La nomenclatura y los sentidos positivo y negativo de los ejes están definidos en la norma ISO 84:2001, siendo el eje Z aquel sobre el que se produce el movimiento principal de corte. Los robots, primos o hermanos cercanos de las máquinas herramienta en cuanto a mecanismos espaciales, suelen tener seis grados de libertad dado que agarran formas complejas que sí requieren 6 coordenadas para definir su posición en el espacio.

En el caso de los tornos, los mecanismos son más sencillos dado que en la operación de torneado la pieza es la que gira y produce el

movimiento de corte, y la herramienta solo requiere 2 ejes (X y Z). Un torno con más ejes implicaría hablar de centros de torneado o de máquinas multitarea, a lo que nos referiremos más adelante (sección 9).

En los centros de fresado de cinco ejes la estructura es más compleja. Así son tres las configuraciones comunes que se muestran en la figura 18; la cadena cinemática se suele definir partiendo de la pieza hacia la punta de la herramienta, donde L significa un eje lineal y R un eje de rotación.

¿Hay razones para elegir una u otra configuración? Sí, una de ellas es el tamaño y peso del componente, fíjense que en la primera con-

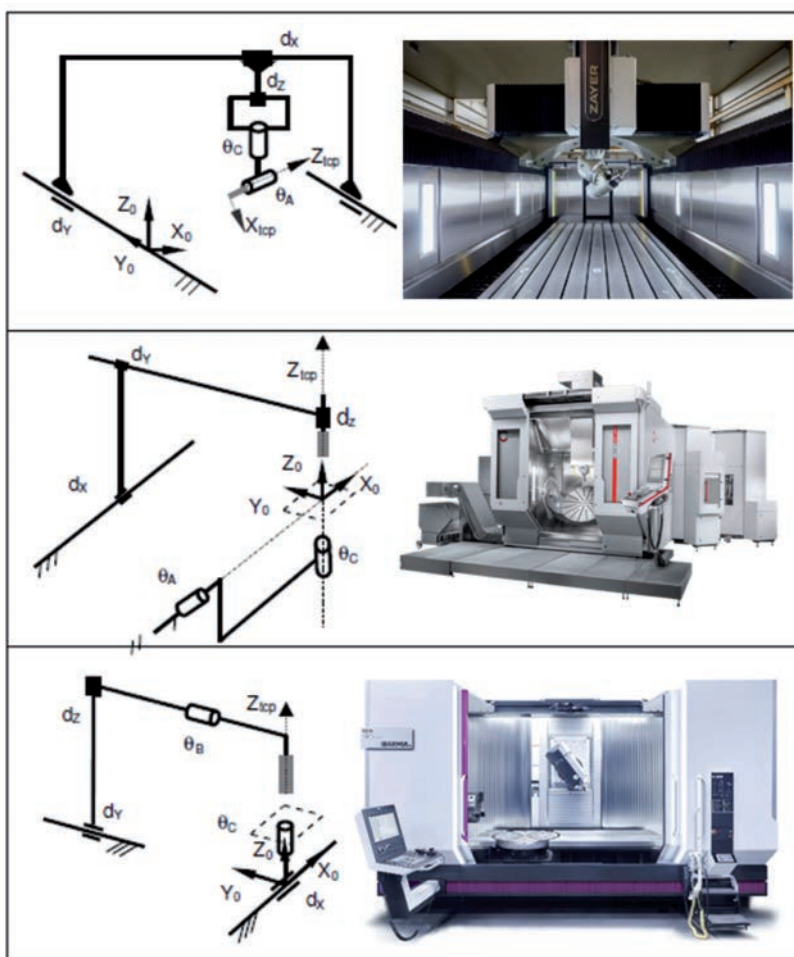


Figura 18: Tres mecanismos para una fresadora de cinco ejes. Arriba. LLLRR, modelo AETOS de Zayer®. Centro. RRRLL, Hermle® C 52. Abajo. RLLLR, el modelo de Ibarmia® ZVH55.

figuración la pieza es fija, y es la herramienta la que ejerce todos los movimientos. Suele ser clásica en sectores como el de matricería y moldista, o en componentes aeronáuticos del fuselaje donde el peso o el tamaño de la pieza son muy elevados. Suele denominarse configuración tipo pórtico o puente, con cabezal birrotativo.

La segunda configuración, llamada de cuna basculante, es clásica en componentes de menor tamaño o peso, como son picerío general, álabes, moldes pequeños, carcasas de turbomaquinaria, rotores integrales rotativos, prótesis, etc. Estas máquinas suelen tener más agilidad, es decir, permiten aceleraciones mayores en la punta de la herramienta.

La tercera incorpora un eje de giro en el cabezal y otro en la mesa de trabajo, suele utilizarse en aplicaciones donde el tamaño de pieza y máquina es importante, o en piezas largas con caras poligonales.

No en pocas ocasiones es la tradición y experiencia de una empresa de máquina herramienta en un tipo de estructura la que mayoritariamente explica las familias de máquinas ofrecidas. Incluso las grandes multinacionales con miles de empleados, que surgieron a principios de este siglo por fusión de grandes empresas en Alemania y Japón, todavía ofrecen configuraciones muy relacionadas con una determinada factoría o empresa originaria del grupo.

Cuando se ejecuta un proceso se definen tres sistemas de referencia, (i) un observador situado en la pieza de trabajo (WRS, *Workpiece Reference System*), (ii) situado en la bancada de la máquina (MRS, *Machine Reference System*) y finalmente (iii) situado en la punta de la herramienta (TRS, *Tool Reference System*). Los tres son útiles. Así, en el primero se definen todas las operaciones de mecanizado dado que los programas de control numérico se realizan sin conocer dónde se ubica la pieza en la zona de trabajo de la máquina. El segundo es el que definiría un observador externo y en el que se determinarían los movimientos reales de la máquina. El último es el que utiliza el control de la máquina para desplazar la punta de la herramienta respecto a la superficie a mecanizar. Siempre debe realizarse una conversión del primero y el tercero al segundo. En las máquinas manuales era y es el usuario el que lo hace interpretando los planos de la pieza, pero en las máquinas CNC es este dispositivo de control el que realiza esta función. La primera conversión se conoce como *poner el cero* para ubicar la pieza; tras ello se debe producir otra conversión, la *interpolación* para trasladar los movimientos de punta de herramienta a los ejes de la máquina.

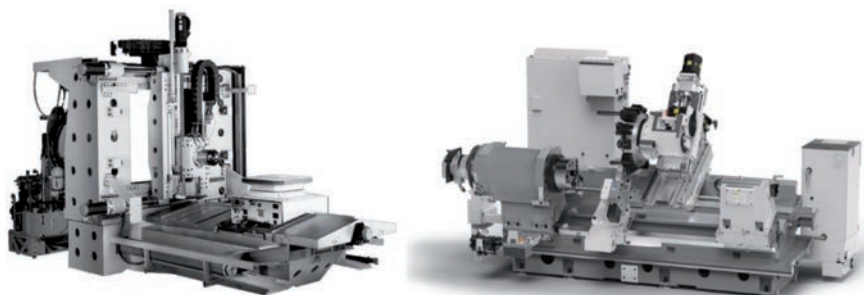


Figura 19: Izda. Un centro de mecanizado horizontal sin carenado.
Dcha. Un torno (cortesía de CMZ®).

La figura 19 muestra dos máquinas sin carenado, un centro de mecanizado de husillo horizontal con tres ejes y mesa rotativa, y un torno con eje adicional Y dado que cuenta con un eje deslizante inclinado sobre el eje X. Como se puede observar en ambos casos, la construcción de mecanismo y estructura es única y muy robusta, ambas utilizan componentes estructurales de fundición.

La estructura de la máquina debe soportar los pesos de los componentes de la máquina y soportar las fuerzas procedentes del proceso, manteniendo una rigidez suficiente para conservar la precisión requerida. Por otro lado, debe conseguirse una alta relación de amortiguación para mitigar las vibraciones del proceso, y por último debe presentar una baja distorsión térmica. En la estructura se incluyen dos tipos principales de elementos:

- Bastidor y bancada. Los cuerpos principales de la estructura constituyen la bancada y bastidor de la máquina. Puede construirse en un solo bloque (véase la figura 20) o ensamblando varios sub-bastidores. En la bancada descansan todos los demás componentes, ésta es la base sólida de la máquina después de su construcción, colocada sobre el suelo del taller sobre algún tipo de soportes de aislamiento. En máquinas de gran peso, incluso se construyen fosos y fundaciones específicamente diseñadas.
- Los componentes estructurales. Forman parte del mecanismo, estando unidos con movimiento relativo entre ellos. La interfaz entre estos elementos debe ser muy rígida y amortiguada a lo largo de la dirección perpendicular al deslizamiento, pero debe permitir un movimiento suave en la dirección del movimiento.

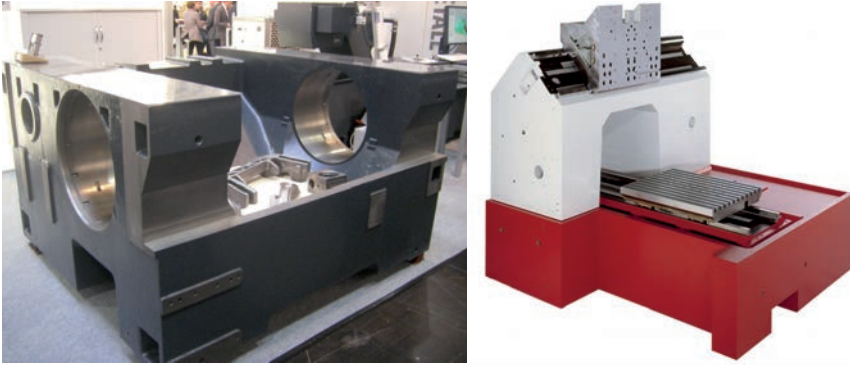


Figura 20: Estructuras de máquinas monobloque. Izda. Bancada fundida por Alzmetall®.
Dcha. Estructura de máquina por Rödgers®.

Se utilizan dos conceptos en el diseño general de las estructuras, las configuraciones de lazo abierto y de lazo cerrado. En el primer caso, las fuerzas del proceso se conducen al suelo a través de una sola vía estructural, mientras que en el caso cerrado las fuerzas se derivan por varias vías al suelo (elemento fijo). Obviamente, en el primer caso la estructura resulta más débil, por lo que resulta un mayor error de la posición de la punta de la herramienta debido a la deformación de la máquina bajo la acción de las fuerzas de corte; en el segundo, la rigidez medida en la punta de la herramienta es mayor.

El bucle abierto característico de las fresadoras es la configuración tipo C o G (o de rodilla), muy común en máquinas pequeñas. El acceso a la zona de trabajo es fácil, pero esta estructura es sensible a las cargas térmicas y mecánicas (torsión y flexión), con una respuesta asimétrica.

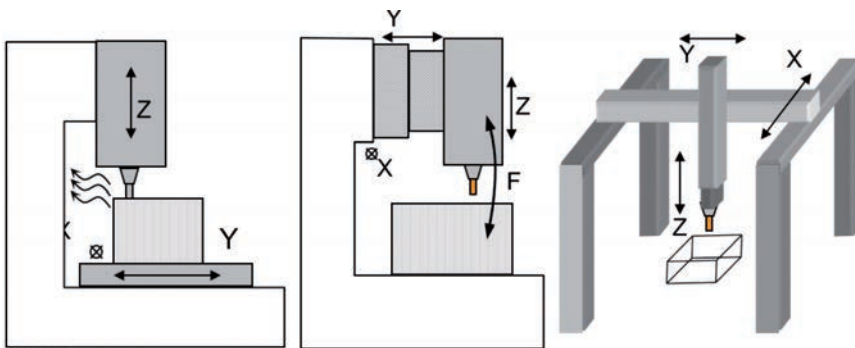


Figura 21: Tres tipos de estructuras. a) Columna fija tipo C. b) Columna móvil tipo C.
c) Puente con traslación, todos los movimientos en la herramienta.

El voladizo de la estructura produce errores angulares o de Abbe. En la figura 21 se presentan dos diseños. Así, el caso (a) es la denominada “columna fija”, más rígida pero afectada por el calor procedente del proceso de mecanizado, y además la mesa mueve diferentes masas dependiendo del peso de la pieza. El segundo es la “columna móvil”, menos rígida pero que mueve siempre la misma masa al permanecer la pieza fija; otra ventaja de ésta es que permite colocar una pieza en una zona de la mesa mientras se fresa otra pieza en la otra zona de la mesa, si la mesa de la máquina es lo suficientemente larga.

En cuanto a las configuraciones de bucle cerrado, la estructura de puente o pórtico se utiliza en máquinas medianas y grandes, que suelen realizar trabajos pesados o de acabado preciso en piezas grandes. En algunos casos el puente es fijo y la mesa se mueve, en otros la pieza es fija y todos los movimientos se materializan en el puente o por una viga móvil colocada sobre el puente (caso c de la figura 21).

Hace veinticinco años se vivió en el sector un cierto éxtasis ante la cinemática paralela, configuración donde todos los grados de libertad se articulan con respecto al elemento fijo. Aquí los principios de rigidez, comportamiento cinemático y dinámico son algo diferentes con respecto a la cinemática serie. La primera aplicación fue el prototipo Variaxis de Gidding & Lewis™, presentado en 1994 en la IMTS de Chicago, ver figura 22. La idea era interesante, esto es, fabricar elementos móviles tipo patas telescópicas, configurar estructuras tipo hexápodos, calibrar y corregir problemas por software. Gran idea en teoría, pero resultó un gran espejismo y así hoy las máquinas que se construyeron están en museos. La razón es

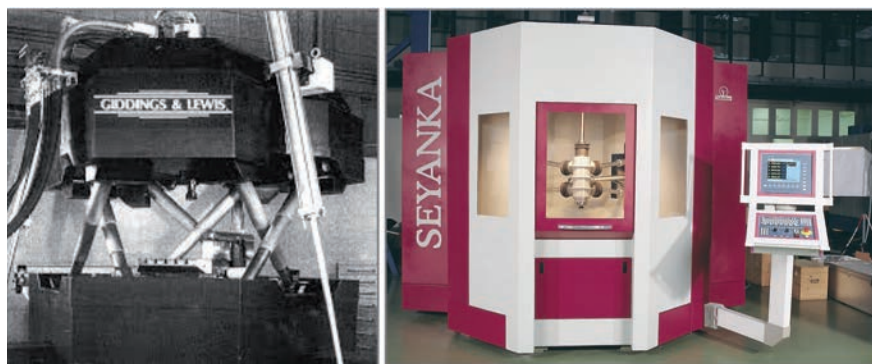


Figura 22: Variaxis de Gidding & Lewis© (1994) y Seyanka de Tekniker (aprox. 2002).

simple, para estas máquinas moverse en una recta implicaba mover todos sus ejes, mientras que en una de tipo cartesiano (cinemática serie) solo se mueve uno y por tanto su precisión se consigue por perfección en la construcción mecánica de cada eje. De estos años sí quedó el concepto para su aplicación en robótica y manipuladores.

Tanto la bancada como los componentes estructurales deben ser rígidos, ligeros para minimizar fuerzas de inercia, y fáciles de fabricar. Teniendo esto en cuenta, en las estructuras de las máquinas se utilizan cuatro grupos de materiales:

1. La fundición gris es el material más común debido a su estabilidad, facilidad de fundición, alta relación de amortiguación y economía en el mecanizado. Como alternativa, el acero fundido o las fundiciones dúctiles se utiliza en los cabezales, dado que estos elementos trabajan a tensión-compresión y torsión.
2. Los bastidores soldados se utilizan en máquinas grandes y evitan los problemas habituales inherentes a la fundición de grandes componentes, o cuando se requiere un tiempo de producción corto, dado que la calderería es un sector ágil en plazos. La principal desventaja es la baja amortiguación del acero; algunas soluciones que utilizan rellenos como arena o polímeros mejoran la amortiguación y atenúan las vibraciones. Otros problemas típicos en esta solución estructural se derivan de las tensiones residuales y distorsiones típicas de la soldadura.

Estos son los dos conceptos de material estructural que compiten en el mercado, evaluando por un lado criterios relacionados con la rigidez y estabilidad térmica de la fundición, y de otro lado la facilidad de escalar tamaño en las estructuras soldadas para ofrecer toda una familia de máquinas. Además, conllevan un tipo de suministrador muy diferente, o bien el sector de fundidores que tiene gran presencia nacional, o el de calderería, que es muy popular y con numerosísimo surtido de proveedores.

En algunos sectores y en aplicaciones concretas también podemos encontrar otros dos tipos de materiales estructurales:

3. El hormigón polímero, también conocido como “fundición mineral” se utiliza en algunas bancadas de tornos o fresadoras. Su ventaja es su gran amortiguación, pero su principal incon-

veniente es la baja conductividad térmica. Otra ventaja es que antes de su compactado se pueden introducir tubos, conducciones, etc. en la bancada o cuerpos estructurales, dado que el fraguado no eleva la temperatura y no hace peligrar las integraciones.

4. El granito lo usan algunos fabricantes de tornos especiales, rectificadoras y otras máquinas de acabado de alta precisión por su estabilidad térmica. Y por supuesto es material estrella en máquinas de medir por coordenadas.

Un aspecto clave es la modularización. Las máquinas deben personalizarse para triunfar en un mercado mundial altamente competitivo, pero esto debe resolverse con plazos de producción cortos y costes reducidos. Esta doble necesidad se resuelve con un diseño basado en módulos de máquina que pueden colocarse en bancadas comunes. Se evita así una costosa y larga ingeniería especial para cada caso. Además, con ello se consiguen tres ventajas principales:

- Se fabrican bancadas para varios modelos de máquina utilizando el mismo modelo de poliestireno y por tanto aprovechando al máximo cada diseño de componente de fundición.
- Algunas empresas subcontratistas alcanzan una alta especialización produciendo elementos y unidades instalables en distintas máquinas y fabricantes de máquinas. Éste sería el caso de fabricantes de cabezales rotativos, cambiadores de herramientas, indexadores, mesas basculantes, etc.
- La elaboración de ofertas para clientes ubicados en distintas zonas del mundo puede racionalizarse, con una buena personalización a las necesidades del usuario y un cálculo de costes bastante exacto.

Un término que suele utilizarse es el de “máquina Lego”, haciendo un símil con el típico juguete técnico de montaje. Por dar un ejemplo, el centro de torneado de la figura 23 puede configurarse para resolver las especificaciones de varios clientes; pueden tener uno o dos robots de intercambio de herramientas, más de diez cabezales de torneado, mandrinado o fresado, etc.

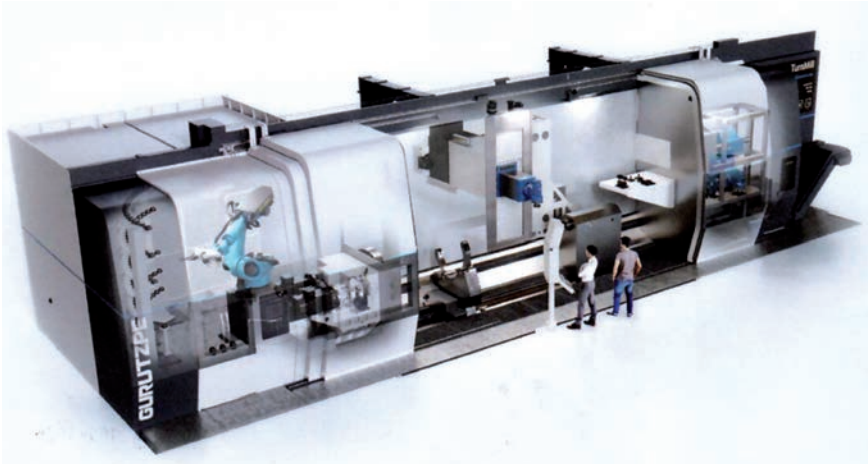


Figura 23: Torno multitarea de Guruzpe®, que puede configurarse para cada cliente, presentado en la EMO de Hannover de 2019.

7.2 Análisis estructurales y térmicos

La máquina herramienta es un manipulador/sistema mecánico complejo, que va a moverse sometido a grandes aceleraciones y soportando las fuerzas del proceso de trabajo. Como en otros campos de la ingeniería, el análisis del sistema por modelos numéricos o analíticos es clave en esta industria; cada característica mecánica, electromecánica o de potencia es analizada, y a partir de los datos obtenidos es optimizada.

Análisis estructural

El comportamiento estructural bajo cargas estáticas o inerciales se realiza actualmente con el método de los elementos finitos (MEF). Aunque las fuerzas de corte son variables en módulo y en dirección, los valores máximos pueden considerarse como datos de entrada para el modelo tridimensional. Tras el MEF, las tensiones y deformaciones equivalentes de la estructura se utilizan como dato para rediseñar los componentes estructurales. Actualmente, incluso los paquetes de software más sencillos pueden realizar un buen cálculo estático y dinámico; en nuestras escuelas de ingeniería, el método de elementos finitos es parte básica de la enseñanza de nuestros futuros ingenieros.

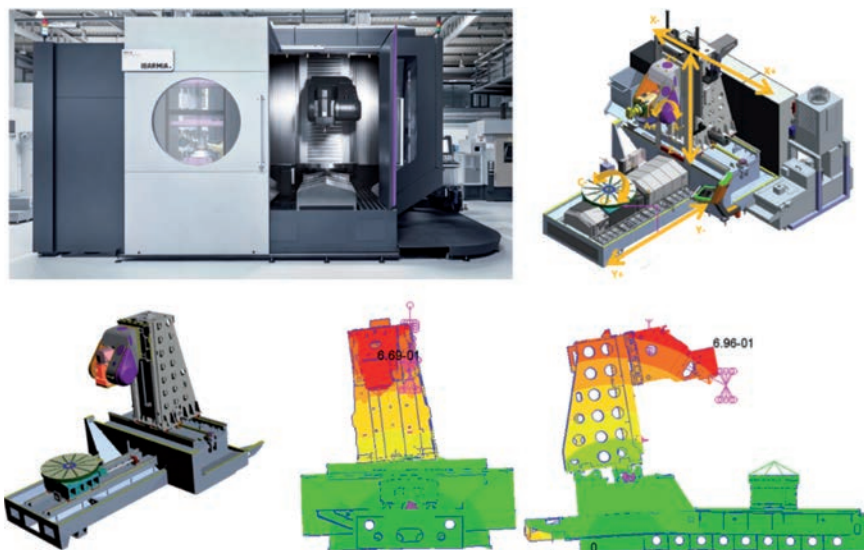


Figura 24: Simulación por elementos finitos de la fresadora-torno Ibarria® THR16, ubicada en CFAA. Arriba. máquina. Abajo. Estructura analizada, y deformación en los planos XZ e YZ.

En el MEF, el aspecto más difícil de definir son los contactos entre los componentes estructurales en las guías ubicadas en los grados de libertad [Te-yen y Lee, 2001], donde la rigidez, la amortiguación, la holgura y otros detalles constructivos son muy difíciles de estimar y por tanto modelizar. La figura 24 muestra una máquina moderna, la Ibarria THR16, que se conoce muy detalladamente tras el análisis (realizado por Tecnalia-BRTA) y es además una máquina de uso diario en el Centro de fabricación avanzada aeronáutica, CFAA. Como se puede observar, se ha realizado un análisis en tres dimensiones, del que surgen los valores de rigidez y deformaciones ante una hipótesis de carga que se considera posible en esta máquina y exigente en magnitud.

Unos valores típicos de rigidez de máquina, medidos como el desplazamiento de la nariz del husillo con respecto a la bancada de la máquina, pueden ser los siguientes. Para un centro de mecanizado vertical, en [Salgado et al., 2005] se calcularon experimentalmente valores de rigidez de aproximadamente $62 \text{ N}/\mu\text{m}$ en X, $33 \text{ N}/\mu\text{m}$ en Y y $67 \text{ N}/\mu\text{m}$ en Z. En otro caso, una fresadora de columna móvil, los valores de rigidez experimental fueron $16 \text{ N}/\mu\text{m}$ en el eje X, $40 \text{ N}/\mu\text{m}$ en el eje Y y $93,7 \text{ N}/\mu\text{m}$ en el eje Z. Otros valores para má-

quinas de 3 ejes pueden oscilar entre 15-25 N/ μm en los ejes X e Y, y 70-100 N/ μm en el eje Z, siendo siempre el Z el más rígido en las fresadoras debido a su estructura; en los ejes X e Y la máquina trabaja a torsión y flexión lateral, mientras que en Z suele trabajar solamente a flexión. En cuanto a las rectificadoras la rigidez es mayor, las *cilíndricas de exteriores* están en el rango de 50-90 N/ μm . En este caso la flexibilidad proviene principalmente de la pieza, colocada entre el cabezal y el contrapunto.

Con algunas variaciones en función del tipo de máquina herramienta, las fuentes de flexibilidad son: la herramienta de corte, el husillo y la columna de la máquina, el interfaz entre husillo y portaherramientas, los carros y guías de los ejes, los husillos de bolas de las transmisiones y evidentemente la propia estructura y bancada.

Una pregunta a menudo planteada es la siguiente: si la flexibilidad (inversa a la rigidez) del conjunto máquina-portaherramientas-herramienta no es tan baja como sería deseable, y las fuerzas de corte sí pueden subir a valores de varios centenares de newton en magnitud, cómo es posible que obtengamos valores de precisión en las piezas (en el orden de las centésimas de milímetro) mucho mejores que los que surgirían del análisis de rigidez (décimas de milímetro). Una primera respuesta es que en el mecanizado de acabado se arrancan secciones de viruta pequeñas que implican fuerzas de corte reducidas. Éste podría ser el caso en torneado, proceso donde las fuerzas de corte son constantes, siendo por otro lado el torno una máquina más rígida que las fresadoras.

Este hecho también es de aplicación al fresado; pero aquí las fuerzas de corte son variables a medida que los filos entran y salen del corte; es importante tener en cuenta que la superficie final es generada cuando el diente corta muy poca sección de viruta, bien sea en el denominado corte en concordancia (espesor mínimo al salir del corte) o en oposición (al entrar en el corte). En otros momentos la deformación de herramienta y máquina son mayores, pero su efecto no se refleja sobre la magnitud de la pieza mecanizada. En la figura 25 se muestra el movimiento del centro de una fresa, en un experimento monitorizado en mi grupo hace ya un tiempo; como se observa existen deformaciones de la herramienta de hasta 0,15 mm, pero que no se reproducen como error en la superficie final, que solamente es 0,02 mm.

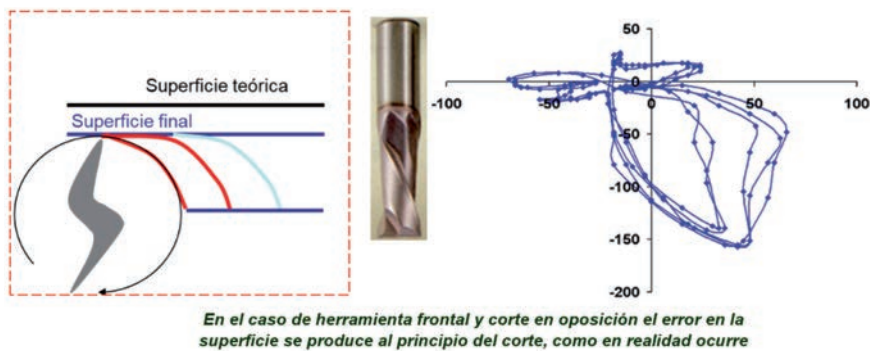


Figura 25: Deformación de una fresa cortando, y producción de la superficie final, los valores son micrómetros.

Respecto a la respuesta dinámica de las máquinas, el análisis numérico de los modos y frecuencias naturales es fácil de ejecutar, pero difícil de ajustar a la realidad [Marinescu et al., 2002]. En los modelos de elementos finitos la amortiguación es siempre un dato de entrada, por lo que debe incluirse de forma aproximada. Sin embargo, en las máquinas reales el amortiguamiento procede principalmente del contacto en las guías, donde los rodamientos en un caso, o las guías de fricción en otros, incluyen incertidumbre en el modelo. Por otro lado, un cuidadoso análisis modal *experimental* puede medir las frecuencias naturales y los modos de una máquina real recién construida con suficiente precisión, ver figura 26. Esta información experimental puede actualizar el modelo MEF empleado en el diseño; pero este acercamiento solo se usa en centros de investigación [Garitaonandia et al., 2008] o en forma de criterios generales y no específicos para una máquina en concreto.

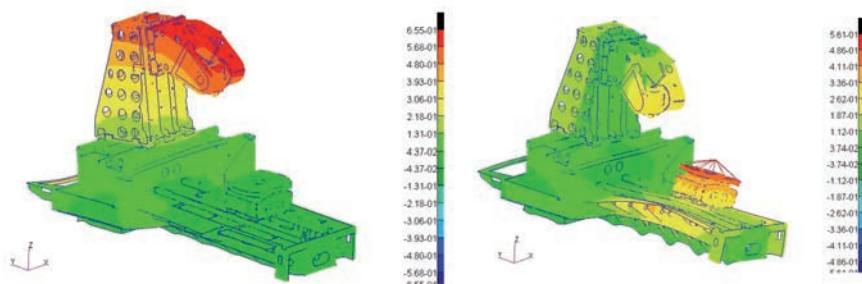


Figura 26: Ibarria® THR16. Izda. Modo Flexión máquina en plano YZ (frecuencia 26,8 Hz).
Dcha. Modo Flexión columna + divisor en plano YZ (44,3 Hz).

Tras el montaje de una máquina, la última etapa del análisis consiste en comprobar el comportamiento real del sistema máquina, pieza y herramienta de corte en una prueba de trabajo en condiciones agresivas. Durante la prueba experimental pueden producirse dos problemas dinámicos. El primero es la vibración estructural forzada bajo la acción de las fuerzas de corte periódicas. Se trata de un problema común a todos los sistemas mecánicos, que se estudia mediante la FRF (*función respuesta en frecuencia*). Para reducir la amplificación mecánica y evitar la posible resonancia, las frecuencias naturales del sistema deben estar alejadas de a) las frecuencias propias del golpear de los dientes de corte, y b) frecuencias naturales de los motores y transmisiones, lo que puede hacerse variando la rigidez y/o la masa de los elementos de la máquina.

Además, en determinadas condiciones de sección de viruta y velocidad de rotación del husillo, puede aparecer el fenómeno conocido como “vibración regenerativa” o “*chatter*”. Este tipo de vibración es muy dañino, provoca por un lado vibraciones del husillo y daños en sus rodamientos, y por otro lado inaceptables marcas en la pieza. La excitación de los modos estructurales de la máquina puede producirse cuando las condiciones de mecanizado son agresivas, en las operaciones de desbaste. Para estudiar esta circunstancia dañina, tras resolver un modelo basado en una ecuación diferencial de segundo orden, se obtienen los denominados “diagramas de lóbulos”; este fenómeno se explicará en el apartado 10.

Análisis térmicos

El análisis térmico de las máquinas es un tema clásico y candente en investigación. El procedimiento habitual consiste en utilizar las capacidades térmicas de los paquetes de MEF, incluyendo como entradas en los modelos las fuentes de calor que afectan a la estructura, como pueden ser los motores, las virutas o los refrigerantes acumulados, la variación térmica entre horas del día, etc. De este análisis pueden derivarse: a) algunos cambios en el diseño de la máquina, b) incorporar sistemas de refrigeración activos, utilizando recirculación de agua, o c) buscar modelos que corrijan las deformaciones por ajuste de parámetros geométricos y que el CNC aplicará en función de algún indicio de carga térmica obtenido por sensores. Pero es claro que la precisión, tanto en cuanto exactitud

como a repetitividad, está muy ligada al correcto estudio y definición de un correcto *escudo térmico* en las máquinas. Se denomina escudo térmico a todas las técnicas concurrentes para minimizar los efectos de la variabilidad térmica en la precisión de las máquinas herramienta.

Los efectos térmicos son fuentes de incertidumbre muy importantes en la precisión. Ya en la década de los 1960, un subcomité específico del CIRP (*The international academy for production engineering*) convocó a ilustres profesores como J.Loxham (Universidad de Cranfield) o J.B. Bryan (Laboratorio Lawrence Livermore, California). En sus primeros trabajos se mencionaba que los errores térmicos pueden constituir entre el 50 y el 70% de los errores finales en la fabricación de piezas de precisión. Así se constató en el primer trabajo de revisión realizado por Bryan [Bryan, 1967] y así seguía siendo 23 años más tarde en la actualización que él mismo presentó en 1990 [Bryan, 1990], "*Not much progress since 1967*" fue su conclusión. En una revisión más reciente [Mayer et al., 2012] se mencionan los avances realizados desde los años 90 en las áreas de medición, simulación y compensación, haciendo hincapié en el incremento de la capacidad computacional que ha permitido mejorar los modelos.

A la hora de clasificar las fuentes de calor que pueden inducir efectos térmicos en una máquina herramienta [Hernández-Becerro, 2020], se suelen incluir los siguientes tipos:

- Calor generado localmente en diferentes puntos de la máquina, siendo el más importante el generado en los rodamientos y motor del husillo principal. Son focos secundarios los motores o husillos de transmisión presentes en diferentes puntos de la estructura.
- Calor generado por el proceso de corte, que es muy intenso como se ha indicado anteriormente.
- Los sistemas de refrigeración del proceso de corte implican la recirculación de un fluido, tanto internamente a través de la estructura, como externamente dirigido al punto de corte y la pieza. En definitiva, el calor del proceso se trasmite a la máquina siendo el circuito de refrigeración (de las taladrinas) un medio de transporte.
- La variación de la temperatura ambiente en el taller, que puede sufrir cambios tanto temporales como espaciales debido a ciclos diarios o estacionales de la temperatura exterior, a la acción de

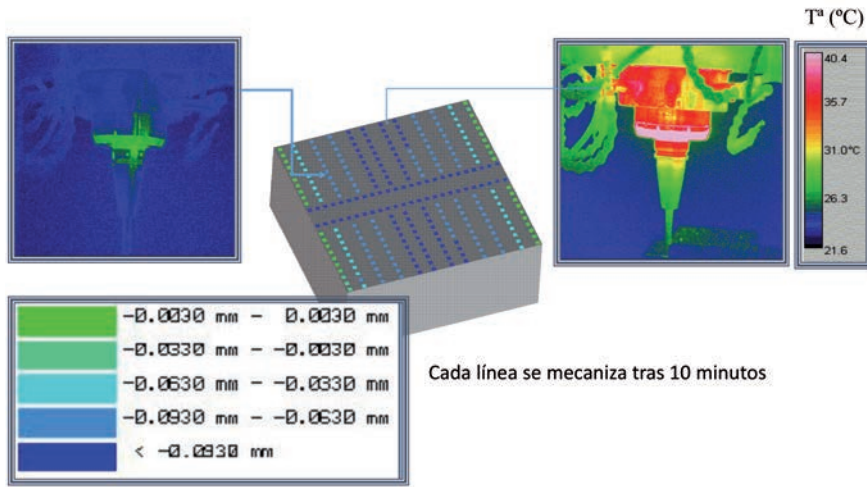


Figura 27: Pruebas de fresado realizadas en la Universidad del País Vasco: se realizaron líneas cada 10 minutos llegando a errores debidos a la dilatación del husillo de casi una décima de milímetro.

sistemas de control de temperatura ambiente, presencia de otras máquinas cercanas que actúen como fuentes externas de calor, etc. Por dar un ejemplo, si un taller no está debidamente aislado y la temperatura aumenta 10°C , para un componente de fundición de 1 m de longitud se produce una variación de longitud en el orden de 0,1 mm. Por tanto, un taller que aspire a precisión debe tener climatización controlada, que supone un gran coste.

La gran mayoría de la actividad investigadora e industrial se ha dirigido hacia los errores térmicos provocados por el husillo principal. Esto es porque es el foco principal de calor en la máquina, pero también por la facilidad de caracterizar esta incertidumbre con secuencias de programas con ciclos de calentamiento y la posterior medición de los errores resultantes (ver figura 27 y 28). La figura 27 muestra los errores debido a la dilatación del husillo al realizar mecanizado en línea cada 10 minutos. Utilizando la función de compensación de longitud de la herramienta, el CNC puede corregir fácilmente el error si se obtiene la temperatura del husillo mediante termopares. Es decir, es un problema muy importante, pero a su vez es de fácil compensación.

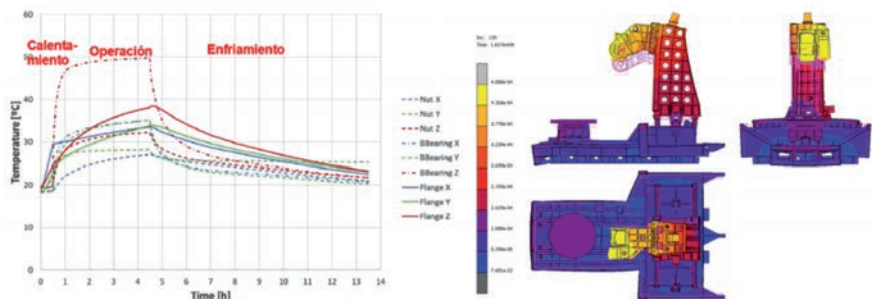


Figura 28: Ciclos de calentamiento de la Ibarria THR16 en trabajo y deformaciones inducidas por el calentamiento en el husillo principal y columna.

Los restantes focos de calor presentan su propia dificultad a la hora de caracterizarlos, así:

- En el caso del calor generado en el proceso de corte, es casi imposible de medir *in process* cualquier distorsión térmica mediante un sistema metrológico externo, debe tenerse en cuenta que la zona de corte es muy pequeña y casi siempre se emplean fluidos refrigerantes. Para superar estas dificultades, en los últimos años han surgido diferentes trabajos que proponen piezas patrón con características geométricas específicas que se mecanizan en diferentes momentos (o de forma intermitente) y aplicando diferentes parámetros de corte. La medición *post-process* de la geometría permite inferir los errores térmicos del proceso. Las normas ISO 10791-10 y 13041-8 se han actualizado para incluir estas piezas patrón.
- Los efectos térmicos debido a los sistemas de recirculación de la taladrina suelen implicar modelos muy complejos, debido a su dinámica rápida en comparación con otros focos de calor y por el hecho de que representan un comportamiento bi-estado (apagado/encendido) que no es fácil de modelizar y compensar, sobre todo en los momentos de transición de uno a otro. Los últimos años se han presentado trabajos con modelos duales [Iñigo et al., 2023], que cambian según el ciclo de la refrigeración.
- Las deformaciones provocadas por la temperatura ambiente son quizás las más complicadas de modelizar y caracterizar por tres razones principales. La primera es que los efectos tienen dinámicas lentas y suele ser necesario medir una máquina durante varios días o incluso semanas para entender sus efectos, los materiales que se emplean en la estructura de las máquinas presentan mucha

inercia térmica. La segunda es la dificultad en laboratorio de incidir en el foco de calor, es decir el propio ambiente, de manera controlada para provocar variaciones de distinto tipo y así caracterizar el comportamiento de la máquina en diferentes situaciones. Controlar la temperatura ambiente requiere sistemas avanzados de climatización y un elevado coste energético. Por último, ya que el ambiente influye en la estructura de la máquina, sus efectos se trasladan a todo el volumen de trabajo de manera compleja y asimétrica, y no basta con caracterizar el error térmico en un punto, son errores volumétricos. Es necesario un procedimiento de calibración volumétrica capaz de cubrir todo el espacio de trabajo con precisión y rapidez para caracterizar los errores térmicos en un momento concreto. En este aspecto han surgido en los últimos años diferentes trabajos [Iñigo et al., 2023] que intentan cubrir el volumen de trabajo con estrategias automatizadas de calibración volumétrica que se repiten periódicamente.

En el diseño de máquinas herramienta se busca siempre que las distorsiones térmicas sean simétricas, dado que son más fáciles de compensar. Éste es un principio clásico de diseño para precisión ante cargas térmicas.

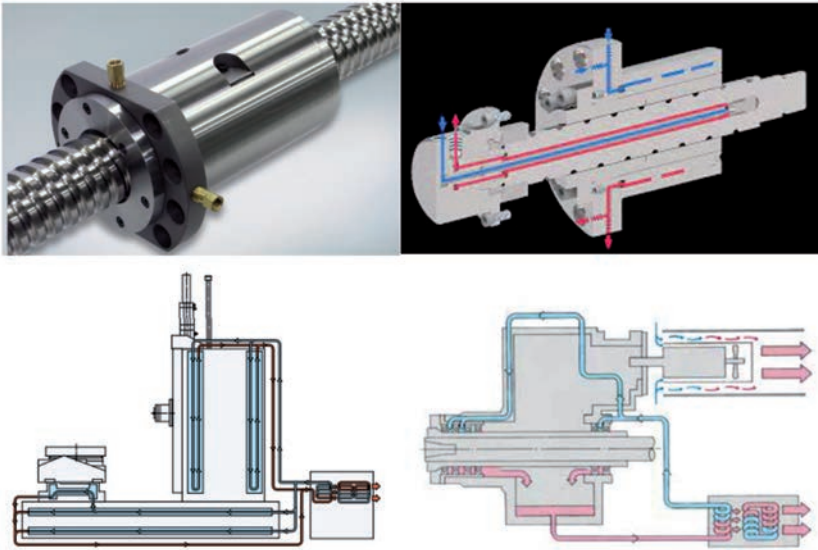


Figura 29: Arriba. Husillo de bolas con tuerca refrigerada (NSK©), o con husillos y tuerca refrigerado (Schneeberger©). Abajo. Estructura refrigerada de una fresadora de Yasda® y de su cabezal.

Las máquinas de elevada precisión incluyen sistemas de refrigeración activos de la estructura mediante recirculación de agua y también se refrigera la camisa de los electrohusillos. Existen también soluciones donde los husillos de bolas se refrigeran, ver figura 29. Estos sistemas encarecen el coste de la máquina, pero es un hecho aceptado que lograr micrómetros de precisión es exponencialmente costoso; por tanto situarse en el negocio de mecanizado de precisión exige elevadas inversiones, como máquinas de este tipo, climatización controlada en los talleres, etc.

Actualmente y aplicando los modelos arriba mencionados se busca la compensación de deformaciones como se muestra en la figura 30, pero aún no se ha llegado a muchas soluciones industriales de uso diario. Las estrategias basadas en la simple modelización, caracterización y compensación del error térmico presentan una alternativa barata en su implementación y son de nulo impacto ambiental. Esta área representa la mayoría de la actividad investigadora de los últimos años, con planteamientos tan distintos como desarrollos de *Gemelos Digitales* [Iriño et al., 2023] o la implementación de redes neuronales de lógica difusa [Abdulshahed et al., 2015]. Este planteamiento presenta grandes dificultades por la compleja relación entre las cargas térmicas y las deformaciones resultantes en la máquina, y la dificultad de definir las condiciones de contorno [Gómez-Acedo, 2014].

Los modelos de datos podrían ser una solución a medio plazo, dado que, siendo ejecutados durante la producción real o en momentos concretos de recalibración de la máquina, podrían aprender durante muchos ciclos y aplicar correcciones volumétricas en grandes máquinas. Estos modelos, en forma de una nueva función en el

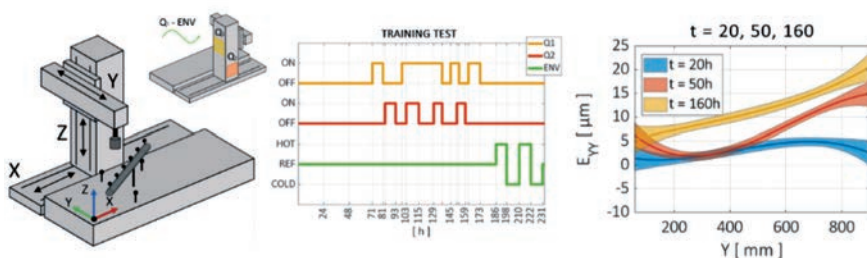


Figura 30: Medida de errores térmicos en una gran fresadora, sometida a ciclos de arranque, parada y funcionamiento. Los errores se miden por contacto con una barra calibrada. Los focos Q1 y Q2 inducen cargas térmicas controladas y similares a las reales [Iñigo et al., 2023].

CNC, generarían un procedimiento de compensación utilizando datos de entrenamiento y posteriormente datos reales, incluso para máquinas con diferentes números de serie a las que se utilizasen para entrenar el modelo. Este acercamiento obligaría a que la empresa fuese muy rigurosa en el registro de los datos de proceso y de la medición de los componentes que fabrique. Podríamos decir que este enfoque se ubica en lo que se denomina inteligencia artificial. Algunos CNCs ya ofrecen alguna función en esta línea tecnológica.

7.3 Las guías

Las guías son responsables directas de la precisión y suavidad de los movimientos de los ejes de las máquinas. Las guías son sistemas deslizantes en los que dos superficies están en contacto, la fija se conoce como *guía*, mientras que la colocada en el componente deslizante (carro) se conoce como *contra guía*. Los parámetros funcionales requeridos para las guías longitudinales son los siguientes:

- Perfección geométrica, ya que cualquier defecto en una guía se traducirá en imprecisiones en la pieza.
- Rigidez, las guías deben soportar las fuerzas de corte y las cargas inerciales sin deformaciones. Dado que siempre existirán deformaciones, se recomienda un valor de deformación constante y un comportamiento simétrico con respecto a la longitud de la guía.
- Resistencia al desgaste y buenas características de fricción guía-contra guía, o con los elementos rodantes de la guía. Para diseñar las guías, se debe considerar el posible gripado o exceso de fricción de los patines en las guías, por lubricación insuficiente o distorsión geométrica provocada por el calentamiento por fricción.
- Suficiente resistencia para resistir los pequeños impactos transmitidos desde el mecanizado, especialmente en caso de un corte altamente interrumpido.

Y para las contra guías, los requisitos adicionales son:

- Ajuste a las guías con suficiente flexibilidad geométrica. Generalmente la guía es dura, pero la contra guía es más flexible.
- Debe considerarse un sistema de precarga para garantizar el contacto preciso con la guía. La precarga debe verificarse pe-

riódicamente para compensar las holguras inducidas por el desgaste.

- El conjunto guía-contraguía debe proporcionar la mayor amortiguación posible para reducir la transmisión de vibraciones.
- Lo más importante es la suavidad de su movimiento a lo largo de la guía, la resistencia al deslizamiento debe ser lo más baja posible.

En diseño de precisión, las guías deben diseñarse utilizando dos principios:

1. Siempre que sea posible, la máquina debe presentar restricciones mínimas en articulaciones, deslizaderas u otras interfaces de elementos. El concepto de “diseño cinemático” [Slocum, 1992], ya comentado cuando nos referimos a las fijaciones y mordazas de piezas, evita las deformaciones inducidas por las restricciones internas y permite aislar los elementos sensibles de la influencia de los soportes que cambian de dimensión y/o de las tolerancias de fabricación. El diseño cinemático proporciona exactamente el número adecuado de restricciones independientes y bien condicionadas, mantenidas por fuerzas de cierre apropiadas para garantizar los grados de libertad deseados entre dos cuerpos rígidos. En la figura 31 se muestra un ejemplo para una mesa de eje lineal, aquí las guías están diseñadas para permitir el movimiento en una dirección y restringir los posibles desplazamientos en las demás direcciones. Así, se introducen dos guías de formas diferentes. La primera es una guía lineal en forma de V, que limita los desplazamientos laterales de la mesa; la segunda es una guía plana que limita sólo el movimiento vertical de la mesa, y que aumenta la rigidez en esa dirección. Si se introdujeran dos guías lineales idénticas con restricciones en las direcciones lateral y vertical, el sistema tendría grados de libertad negativos, y por tanto las imperfecciones de las guías y las uniones podrían provocar deformaciones de los elementos. Por regla general, las restricciones puntuales son menos problemáticas que las superficiales y lineales.
2. El Principio del Movimiento Suave establece que los mecanismos de guiado deben presentar una fricción mínima para conseguir movimientos suaves. La fricción entre los componentes deslizantes (guía y contraguía) genera efectos como la adhe-

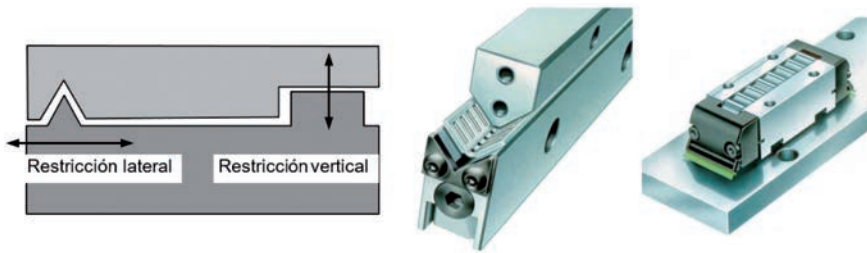


Figura 31: Guía y contra guía: concepto de restricción cinemática mínima, utilizando un conjunto guía en V y guía plana.

rencia, que pueden originar vibraciones difíciles de controlar o efectos tipo *stick-slip*. De ahí que el diseño de los sistemas de guiado deba cumplir dos objetivos: coeficientes de fricción mínimos y constantes.

Los componentes móviles de la máquina son cuerpos espaciales de seis grados de libertad; por lo tanto, las articulaciones mecánicas deben restringir cinco de ellos, al tiempo que permiten el grado de libertad deseado, que puede ser una rotación o un movimiento longitudinal.

Por lo general, las guías entre elementos estructurales se colocan en pares paralelos, suficientemente separados para proporcionar un soporte adecuado de un elemento sobre el otro. Para máquinas de precisión, se suele utilizar el conjunto de guía en V y otra plana, pero para máquinas convencionales se usan principalmente dos guías planas paralelas entre la bancada y el carro, con extremo cuidado para evitar restricciones hiperestáticas durante la instalación. Por lo general, la guía es la maestra en el ensamblaje con su contra guía.

Existen tres tipos básicos de sistemas de guiado, que veremos a continuación.

Guía de lubricación de contorno

Es la no muy bien llamada guía de fricción o prismática. En este tipo de sistema guía-contra guía, una película de aceite de algunas centésimas de milímetro de grosor reduce enormemente el contacto entre las superficies. De esta forma, aunque no se puede evitar completamente el contacto entre las crestas de rugosidad, se logra reducir el trabajo de fricción y calor, y el coeficiente de fricción. El

aceite debe inyectarse periódicamente a través de la contraguía para asegurar que exista película. Con este fin la contraguía tiene pequeños canales en la superficie de contacto interna, llamados *brazos de araña*, para proporcionar un suministro uniforme de aceite en toda la superficie de contacto.

La principal ventaja de este tipo de guía es la alta relación de amortiguación. Como principal desventaja, la fricción es demasiado alta para trabajar a elevadas velocidades y además el calor de fricción puede afectar a la precisión e incluso la vida útil de la guía. El fenómeno de *stick and slip* (enclavamiento-deslizamiento) también es frecuente a bajas velocidades.

Las guías se pueden mecanizar y rectificar directamente sobre el material estructural, o ser construidas en acero endurecido y atornilladas a la estructura de la máquina donde se rectifican para lograr la rectitud final. Actualmente, se suele utilizar una lámina de polímero de algunos milímetros de grosor (como el teflón, PTFE, politetrafluoroetileno) que se adhiere a la superficie de contacto de la contraguía. Estos materiales reducen en gran medida la fricción con el acero o el hierro fundido. Algunas marcas frecuentemente utilizadas son Turcite®, Moglice®, Glacier DP4™ y Glacier DX®.



Figura 32: Rasquetado de guías en la empresa Nicolás Correa.

El ajuste final del carro sobre la guía es una operación que se realiza manualmente por parte de operadores capacitados utilizando rasquetas en forma de cincel, y tinta para comprobar el contacto (el conocido azul de Prusia o bermellón), el rasqueteado se muestra en la figura 32. La cantidad de material eliminado con cada movimiento de la rasqueta es de aproximadamente 1-3 μm , lo que permite crear cualquier forma deseada. El patrón de superficie resultante en forma de pequeñas cavidades de tipo “media luna” es beneficioso para retener el aceite a lo largo del movimiento del carro.

La guía de fricción se utiliza mayoritariamente en tornos donde los movimientos de los carros son lentos, así como en máquinas de alta precisión para lograr una muy buena rectitud y planitud. Por el contrario, en máquinas de alta velocidad, donde se requieren inversiones continuas de movimiento en los ejes, no se recomienda esta solución.

Guías lineales

Una guía lineal de bolas o rodillos es una “linearización” del concepto de rodamiento, utilizando la rodadura de bolas o rodillos sobre la guía; los elementos rodantes están separados por una jaula o retén flexible, recirculando dentro de un canal incluido en el carro. Al igual que en el caso de los rodamientos, las bolas son adecuadas para cargas ligeras y altas velocidades, y los rodillos para cargas mayores pero velocidades más bajas. Las teorías de contacto de Hertz y la resistencia a la rodadura explican el comportamiento y principios de diseño de este sistema.

Este conjunto comprende una guía de riel, un carro con limpiadores elásticos integrados en las caras extremas, bandas de sellado en las caras superior e inferior del carro, y tapones de cierre para cerrar los orificios de fijación en la guía. El carro y la guía de una guía lineal de bolas o rodillos se ajustan y se montan entre sí como un sistema estándar, con un valor de precarga que presenta una tolerancia estrecha.

Las guías de rodadura presentan una oposición menor al desplazamiento. La instalación y mantenimiento es fácil, mediante el montaje o sustitución rápida en caso de daños en las guías o carros. Por lo general, los fabricantes de máquinas herramienta las adquieren ensambladas y con la longitud de guía requerida, con la contraguía o patín montado en la guía y precargado a un valor específico calculado según la carga estimada a mover.

La principal desventaja de este sistema deslizante es su baja amortiguación ante vibraciones, debido al contacto directo metal con metal de la bancada-guía-rodillo-carro. En el mercado existe oferta de carros adicionales, especialmente diseñados para aumentar la amortiguación utilizando polímeros o induciendo una película de aceite; se pueden insertar entre los patines de rodadura.

La vida útil de este tipo de guías está determinada por la fatiga de los elementos rodantes o las pistas, de la misma manera que en los rodamientos. Por lo tanto, su selección sigue una variación del enfoque de Palmgren y Miner para los rodamientos, y se estandariza en la norma ISO 14728-1:2004 *Rolling bearings - Linear motion rolling bearings- Part 1: Dynamic load ratings and rating life*.

Guías hidrostáticas

En la lubricación hidrostática una película de aceite separa completamente los elementos deslizantes, con un grosor suficiente para evitar el contacto. Para mantener la película se requiere una bomba externa que inyecte continuamente aceite en el apoyo.

Cuando se utiliza esta técnica en articulaciones rotativas, el resultado es un diseño extremadamente rígido con un descentramiento radial mínimo; la presión ejercida por la película centra automáticamente el husillo en los cojinetes. Por otro lado, la rigidez del cojinete es proporcional a la presión suministrada. Además, la principal ventaja de los cojinetes hidrostáticos de aceite es su relación de amortiguación muy alta, muy importante cuando se mecanizan materiales duros y/o frágiles. Por lo tanto, los husillos con cojinetes hidrostáti-

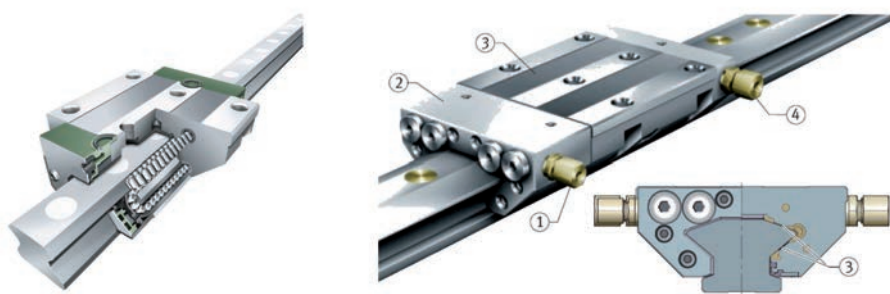


Figura 33: Guía lineal de INA®. a) Guía de rodillos modelo RUE. b) Modelo del carro hidrostático HLE-45: los puntos 1 y 4 son la entrada y salida de aceite respectivamente

cos se utilizan en rectificadoras de alto costo o en tornos pensados para trabajar sobre aceros templados.

Por otro lado, actualmente se están desarrollando nuevos diseños de guías lineales basadas en el principio hidrostático. El problema radica en inyectar y recoger aceite a lo largo del deslizamiento del carro sobre la guía. Productos como Hydroguide™ se están instalando en fresadoras y rectificadoras de alta precisión, brindándoles una alta amortiguación, fricción estática casi cero, error de inversión cero, una reducción significativa del calor por fricción y logrando una alta rectitud. Para máquinas de mecanizado, también se han desarrollado patines basados en hidrostática, como el modelo HLE-45 de INA™ que se muestra en la figura 33.

En platos rotativos de gran diámetro, el soporte hidrostático del disco en la brida de mayor diámetro soporta cargas muy pesadas sin fricción en el radio externo (el par de fricción depende del radio del anillo de fuerza), y se pueden usar rodamientos de rodillos en el eje central del plato. En España existe buena tecnología en este campo, dado que existen fabricantes de grandes tornos verticales como Bost® o GMTK®.

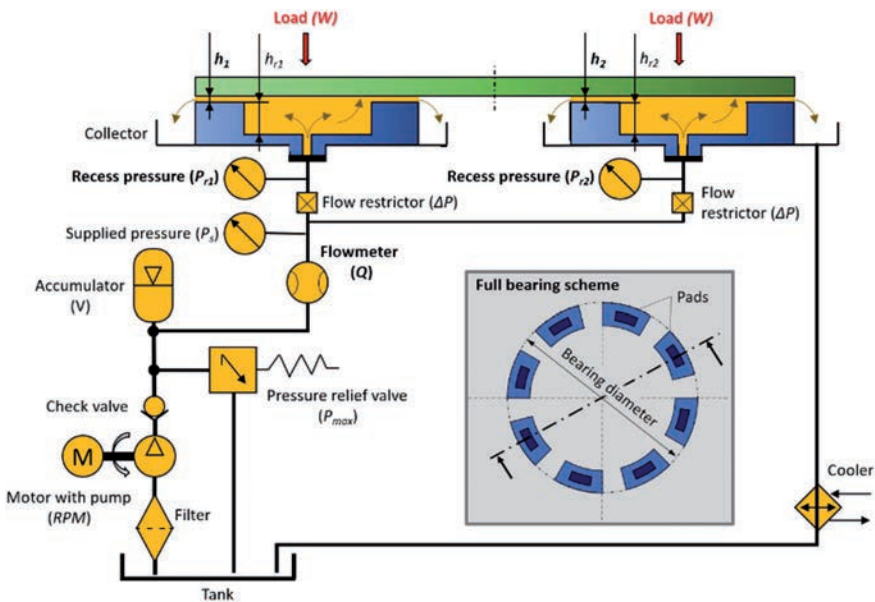


Figura 34: Sistema hidrostático. Esquema completo del circuito hidráulico y sección transversal de dos pads de un cojinete hidrostático multipad de gran tamaño [Michalec *et al.*, 2021].

En los sistemas hidrostáticos los sistemas de autocompensación son complejos, así se muestra un ejemplo en la figura 34. Deben incorporarse válvulas o restrictores de presión [Urreta, 2017] que eviten que el aceite escape de las cámaras (*pads*) cuando existen cargas elevadas.

7.4 El accionamiento principal, motor del corte

El accionamiento principal ubicado en el cabezal de la máquina es el responsable del movimiento de fresado, torneado, taladrado, rectificando, etc. El motor eléctrico del cabezal de elevada potencia debe aplicar un movimiento relativo entre el filo de corte (o los filos) y la pieza de trabajo.

En los tornos, la pieza de trabajo se mueve por la acción de un motor eléctrico denominado cabezal y la herramienta se fija en algún tipo de carro. El caso contrario se produce en el taladrado, fresado, roscado con macho y la mayoría de las operaciones con herramienta rotativa, donde la herramienta es movida por un motor eléctrico.

Los motores de inducción asíncronos son los más ampliamente utilizados en cabezales [Abele et al., 2010]. Para su dimensionamiento y selección los dos datos de entrada son: a) el mayor par posible exigido, y b) la velocidad de rotación deseada para proporcionar la velocidad de corte recomendada (V_c). El siguiente ejemplo muestra cómo definir el par y la potencia de un torno para piezas de gran diámetro. Así, un cliente hipotético podría desear torneado una pieza de $\varnothing 300$ mm fabricada en la aleación Inconel 625 (dureza 250 HBN). Una situación novedosa puede ser emplear plaquitas cerámicas que pudieran llegar a aplicarse con un avance de 0,3 mm/rev, una velocidad de corte V_c de 250 m/min. La velocidad de rotación de la pieza resulta ser de 265 rpm para esta velocidad de corte. Puede considerarse una profundidad de corte de 4 mm, propia de una operación de agresividad elevada. Se realizan algunos cálculos:

$$\text{Par} = \text{Fuerza de corte} * (\text{Diámetro}/2)$$

$$\text{Sección de viruta no deformada} = \text{avance} * \text{profundidad de corte}$$

$$\text{Fuerza de corte} = \text{Fuerza específica de corte} * \text{Sección viruta no deformada}$$

$$\text{Potencia} = \text{Par} * \text{Velocidad de rotación}$$

Utilizando unos valores para la fuerza específica de corte para esta superaleación (4.200 N/mm^2) disponibles en libros o en catálogos de herramientas, los resultados son un par 756 Nm y potencia de 21 kW . En este caso la elevada fuerza específica de corte se debe a que se trata de una aleación difícil de mecanizar. Teniendo en cuenta estos resultados, se puede seleccionar un motor para este torno aplicando un factor de seguridad, y así unos valores factibles podrían ser una potencia de 30 kW y un par máximo de 1.000 Nm .

Existen tres tipos de configuraciones principales para el cabezal, como se muestra en la figura 35. El primero es el convencional y más ampliamente utilizado, donde el motor está conectado al husillo mediante una correa de distribución. La correa de caucho de tipo sincronizante es un buen aislante de vibraciones. Esta solución es posible hasta una velocidad de rotación de 6.000 rpm .

El segundo tipo es la transmisión directa mediante un acoplamiento flexible y directo entre el motor y el husillo. Así se logra una transmisión de par fiable siendo posible alcanzar velocidades de rotación de hasta 12.000 rpm , e incluso 16.000 rpm en casos especiales. Al mismo tiempo, el acoplamiento flexible actúa como un eficaz aislante térmico entre el motor y el husillo. Con un montaje adecuado del husillo en la estructura de la máquina, las dilataciones térmicas se transfieren hacia el acoplamiento y el motor, sin influir en la posición de la herramienta. Por eso, es la configuración más utilizada en máquinas de precisión.

Finalmente, las máquinas de alta velocidad requieren velocidades de rotación superiores a 18.000 rpm , montan electrohusillos com-

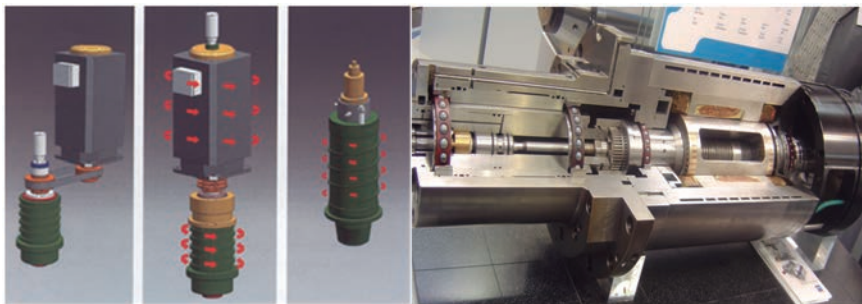


Figura 35: Izda. Las tres formas de conexión motor y husillo en máquina herramienta. Dcha. Corte de un electrohusillo: muestra rodamientos, motor y canales de refrigeración (ranuras rectangulares en periferia).

pactos, donde el motor eléctrico está integrado dentro del husillo. Esta solución mecánica proporciona muy buena concentricidad del conjunto, necesaria para altas velocidades. Los rodamientos de bolas angulares son híbridos, con pistas de acero y bolas de cerámica para reducir la fricción a alta velocidad, pero la cerámica es frágil en caso de una eventual colisión de la herramienta contra la pieza de trabajo. Los rodamientos híbridos poseen bolas de nitruro de silicio (Si_3N_4) con una densidad de $3,16 \text{ kg/dm}^3$ y un módulo de elasticidad de 320 GPa mucho más alto que el acero habitual para rodamientos de rodillos 100Cr6 con densidad de $7,85 \text{ kg/dm}^3$ y módulo de elasticidad 210 GPa.

Por otro lado, el calor generado por el motor y la fricción en los rodamientos es considerable, por lo que se requiere un circuito interno de refrigeración por agua o aceite, con sistemas auxiliares de refrigeración externa. Los canales rectangulares en la periferia de la camisa del husillo de la figura 35 son para recircular agua.

Actualmente los electrohusillos se encuentran sensorizados en temperatura, para corregir por control la deformación térmica longitudinal de los mismos, e incorporan acelerómetros para poder detectar colisiones, o vibraciones que puedan dañar los rodamientos.

Respecto a la ubicación en máquina, los husillos de elevada potencia suelen disponerse en horizontal, dado que es más fácil su sujeción y soporte. Esto suele ser habitual en mecanizado de componentes en automoción, dado que en esta aplicación las fresas y otras herramientas cortan con muchos dientes simultáneamente y por tanto el par y potencia de corte es elevado; como consecuencia el diámetro del husillo y su peso es elevado. En otras aplicaciones es más habitual que el husillo se monte vertical, solución que ofrece más zona de acceso y mayor facilidad de colocación de las piezas sobre la mesa de la máquina.

Finalmente indicar que un equipo característico en las máquinas herramienta son los variadores de velocidad. Son convertidores de frecuencia que convierten el suministro trifásico constante en un suministro trifásico variable. Así, los husillos de motor integral generalmente son alimentados por un inversor trifásico de dos niveles con salida modulada por ancho de pulso (*PWM Pulse-width Module*).

7.5 Los accionamientos y sistemas de transmisión a los ejes

Clásicamente y todavía hoy, los husillos de bolas han sido uno de los símbolos de las máquinas herramienta. Son una solución mecánica fiable para convertir el movimiento rotativo del motor eléctrico en movimiento de desplazamiento en un eje lineal de la máquina. Hoy en día otra posible solución son los motores lineales que permiten desplazamientos longitudinales sin emplear sistemas de transmisión mecánica, pero incluso así los husillos de bolas siguen siendo la solución menos costosa y eficiente.

En la figura 36 se muestra la cadena cinemática o tren de transmisión de un eje. El motor de avance, generalmente sin escobillas síncrono, se acopla al husillo (eje) mediante un acoplamiento flexible que es un buen transmisor de par, además de un aislante térmico y elimina la necesidad de una alineación perfecta del motor con respecto al husillo. En otros casos, la conexión del motor al husillo se podría realizar mediante una correa, con las mismas ventajas y desventajas que el caso de utilizar correas para el husillo principal indicado anteriormente.

Habitualmente el husillo está soportado en ambos extremos por rodamientos angulares de bolas o rodillos cónicos, en configuración *double back* (DB, espalda contra espalda) para aumentar la rigidez del eje.

El carro a mover se fija a la tuerca; las tuercas pueden ser cuadradas, redondas o con bridas para un ajuste más rígido al componente móvil de la máquina.

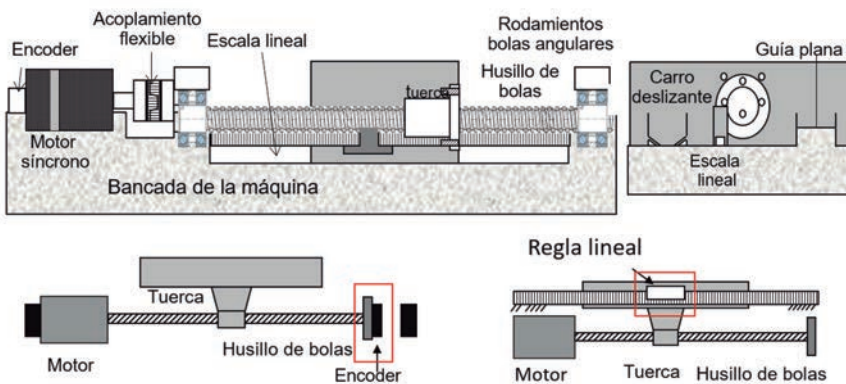


Figura 36: Cadena de transmisión y sistemas de medida de posición: indirecto y directo.

Los diámetros de los tornillos varían entre 6 y 100 mm, mientras que el paso se encuentra entre 1 y 60 mm, manteniendo cierta proporcionalidad entre estas dos características. Si el paso es alto se pueden obtener movimientos rápidos, pero con una baja ventaja mecánica. Los pasos pequeños implican movimientos lentos, pero con una alta ventaja mecánica; al mismo tiempo, un paso pequeño es recomendable para garantizar la precisión y controlabilidad del tren de transmisión.

El cálculo de los tornillos se fundamenta en prevenir dos problemas mecánicos. Primero, el pandeo debido a que el eje trabaja bajo compresión cuando la tuerca se desplaza a lo largo del tornillo. Segundo, se deben evitar las velocidades críticas de giro, cuando el eje gira y la tuerca se mueve a lo largo del tornillo. Una configuración menos habitual es cuando el tornillo está fijo y el motor hace girar la tuerca, en este caso el motor debe colocarse sobre el carro.

La deformación térmica del tornillo es un aspecto clave que se debe estudiar y reducir. Durante el funcionamiento el calor generado por la fricción del movimiento de las bolas sobre el filete provoca una dilatación longitudinal significativa del tornillo. Aproximadamente el 7-10% de la potencia se convierte en calor. Si el eje se ha colocado con pretensado, esta buena práctica absorbe parte de la dilatación, aunque siempre se producen algunos micrómetros de deformación. Para reducir la dilatación, una solución en máquinas de alta precisión es el enfriamiento forzado del tornillo mediante un fluido, interno al eje hueco, o incluso el enfriamiento forzado de la tuerca (ver figura 29). Esto incrementa el costo, pero mantiene la deformación térmica dentro de los requisitos de la máquina.

Respecto al control de posición del eje, si ésta se mide mediante una escala lineal directa, la deformación térmica del husillo es considerablemente menos importante, ya que el CNC trabaja para alcanzar la posición deseada del eje hasta que coincida con la medida obtenida por la escala lineal. Por lo tanto, el aislamiento térmico de las escalas de medición de las fuentes de calor de la máquina es esencial, dado que son el sistema de medida y referencia metrológica de la máquina.

TABLA 2. COMPARACIÓN BÁSICA DE SISTEMAS DE ACCIONAMIENTO
5 EXCELENTE, 4 BUENO, 3 APTO, 2 DEFICIENTE, 1 POCO RECOMENDABLE

	Aceler.	Dinámica	Precisión	Repet.	Par/ fuerza	Rozam.	Holgura	Precio
Husillo a bolas	3	$\frac{4 (<3,4 \text{ m})}{2 (>3,5 \text{ m})}$	4	3	5	4	4	5
Piñón-Cremallera Precarga Mecánica	3	3	3	3	5	2	2	3
Piñón-Cremallera Maestro-Esclavo	4	4	4	4	5	2	4	3
Motor lineal	5	5	5	5	2	5	5	1

Como se ha indicado los motores lineales también son una opción hoy día, pero costosa. Por otra parte, en grandes máquinas se sigue utilizando el piñón-cremallera; en una distancia de cuatro metros se asume que un husillo a bolas puede generar un error de hasta varias décimas de milímetros y en cambio un accionamiento piñón-cremallera genera normalmente un error de pocos micrómetros, si para ello emplea precargas mecánicas o eléctricas e instala piñones y motores trabajando en tándem y configuración maestro-esclavo. Así los sistemas de transmisión se comparan en la tabla 2.

Un motor lineal es un motor eléctrico que posee su estator y su rotor “distribuidos” de forma que produce una fuerza lineal en el sentido de su longitud, ver figura 37. El modo más común de funcionamiento es como un actuador tipo Lorentz, en el cual la fuerza aplicada es linealmente proporcional a la corriente eléctrica y al campo magnético. Los motores lineales pueden superar aceleraciones de varias g , frente a los valores que se puede conseguir con un husillo de bolas, en valores máximos de 1 a 1,2 g . Sin embargo, un motor lineal debe refrigerarse para no sufrir deformaciones térmicas dado que pierde mucha energía en forma de calor. Y no ofrecen ventaja mecánica alguna, esto es, hacer más fuerza requiere un motor más grande o instalar dos motores.

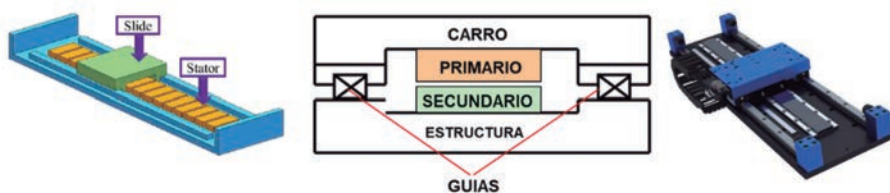


Figura 37: Motor lineal: partes, montaje y ejemplo.

Medición de posición de los ejes

Un sistema de medición directa y libre de perturbaciones o ruidos externos es siempre mejor que uno de indirecta. Los sistemas indirectos necesitan definir varios parámetros geométricos para determinar la posición desde el valor medido, parámetros que inducen fuentes de error. Un ejemplo clásico de este principio es la recomendación de medir la posición de ejes lineales con *encoders* lineales (conocidos como reglas) en lugar de encoders rotativos ubicados en los husillos de bolas.

En la figura 36 se presentaron las dos soluciones de medición. Así, la solución indirecta (fig.36 Izda.) basada en encoder mide la posición angular del husillo a bolas, colocado en el lado opuesto al acoplamiento entre el accionamiento y el husillo a bolas. A partir de este dato, se puede obtener la posición del eje calculando la relación entre el movimiento lineal del eje con la rotación del husillo a bolas, que viene definida por el paso o avance por vuelta del husillo. Aquí el encoder no puede detectar las deformaciones del husillo a bolas debidas a efectos térmicos o de carga, y por otra parte tampoco se detecta la holgura de la tuerca. En otras palabras, el encoder no puede detectar lo que ocurre en aquellos elementos situados después del sistema de medida.

La mayoría de los dispositivos de medición de posición funcionan según el principio de barrido fotoeléctrico, que es un método sin contacto y que no sufre desgaste. Estos sistemas consisten en una fuente de luz proyectada sobre dos graduaciones con periodos de rejilla iguales. Una de las graduaciones, la retícula de exploración, se desplaza con respecto a la otra, la retícula de escala. Cuando la luz atraviesa una retícula, las superficies claras y oscuras se proyec-

tan hacia una barrera fotoeléctrica. Existen dos situaciones límite: en primer lugar, cuando las rejillas están alineadas, la luz pasa y las células fotovoltaicas generan el valor máximo de tensión. En cambio, si las líneas de una rejilla coinciden con los huecos de la otra, no pasa la luz y la señal de las células fotovoltaicas es mínima. La señal resultante del movimiento relativo entre la retícula de barrido y la retícula de escala genera señales de salida casi sinusoidales.

Existen dos tipos de sistemas de medición fotoeléctricos. En primer lugar, si la retícula de exploración es un disco, el dispositivo de medición se denomina codificador rotatorio o *encoder*, así se muestra en la figura 38. Los encoders rotatorios pueden utilizarse para la medición angular de ejes rotativos, mesas basculantes o mediciones de metrología angular. Por otro lado, si la retícula de exploración es una escala lineal, el dispositivo se denomina *encoder lineal* o simplemente *escala* o *regla lineal*. Tanto los encoders lineales como rotativos pueden dividirse a su vez en encoders absolutos y relativos. Los absolutos utilizan una escala formada por varias graduaciones o pistas de código, donde cada posición se corresponde con un código único. Así, la posición se lee directamente y no es necesario encontrar una posición de referencia. Los codificadores relativos utilizan una escala de periodo de rejilla constante, y la posición se mide en relación con una posición de referencia.

La resolución de los encoders relativos es superior a la de los absolutos, y es el dispositivo de medición más típico de las máquinas herramienta de alta precisión, aunque pueden convivir ambos conceptos en la misma máquina. La aplicación de escalas relativas obliga a la ejecución de una secuencia de puesta a cero cada vez que la máquina se enciende, operación que lleva la máquina a una posición de referencia que se considerará el origen del sistema de coordenadas.

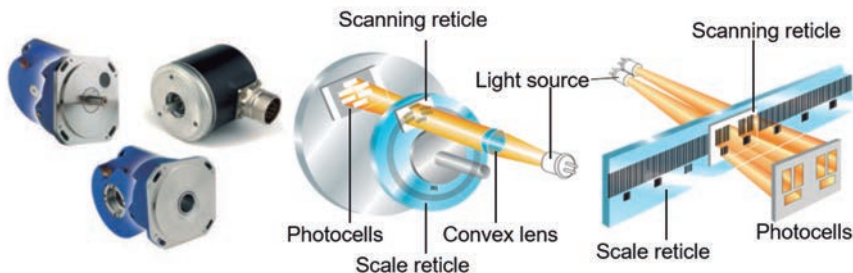


Figura 38: a) Encoders rotativos. b) Barrido fotoeléctrico para un encoder rotativo y lineal. (Cortesía de Fagor Automation®).

La resolución de los codificadores relativos depende principalmente del periodo de la escala de rejilla. Cuanto menor es el periodo de la estructura de rejilla, mayor es la resolución. Además, la precisión de la medición depende de la tolerancia de montaje entre la retícula de exploración y la retícula de escala. En la actualidad, los periodos de retícula típicos son inferiores a 20 μm , y para aplicaciones de alta precisión, existen codificadores lineales con periodos de retícula de 4 μm . Además, la retícula de exploración puede dividirse en varias retículas de exploración desplazadas entre sí. A cada campo de exploración se le asigna una fotocélula y de cada una de ellas se obtiene una señal eléctrica sinusoidal diferente. Así, cada periodo de retícula puede dividirse interpolando las diferentes señales eléctricas de cada fotocélula y la resolución de la medición puede mejorarse hasta 0,1 μm para aplicaciones de alta precisión. En la figura 38 se presenta el principio de barrido fotoeléctrico de un encoder rotativo y otro lineal, de la empresa Fagor Automation®.

7.6 El CNC

El CNC (*Computer Numerical Control*) nació por la necesidad de sincronizar los movimientos de una fresadora. El ingeniero J.T.Parsons desarrolló el sistema Digiton para la fabricación de hélices de helicóptero, y de aquí surgió un contrato con la USAF y el apoyo del MIT. En 1954 la empresa estadounidense Bendix® adquirió la tecnología y desarrolló la primera máquina de control numérico (NC) equipada con más de 300 válvulas de vacío (ver figura 39). La programación de esta máquina se realizaba mediante tarjetas perforadas.

Solo dos años después, unas 100 máquinas NC ya se usaban en la industria aérea estadounidense, y a finales de la década de 1950 llegó a las naciones industrializadas de Europa. Tras las válvulas de vacío se introdujeron los transistores, más tarde los microprocesadores y así se ha llegado al sistema basado en microprocesador que hoy es conocido como CNC. Actualmente el hardware y el software podrían otorgar más potencia y funciones que las hasta ahora utilizadas. Una prueba de ello, y también un enfoque comercial, es que el nuevo CNC de Siemens® se denomina ONE, como si de una nueva especie inteligente se tratara.

De la época primitiva y orígenes del control ha quedado el lenguaje interpretado de códigos denominado ISO o códigos G (ISO

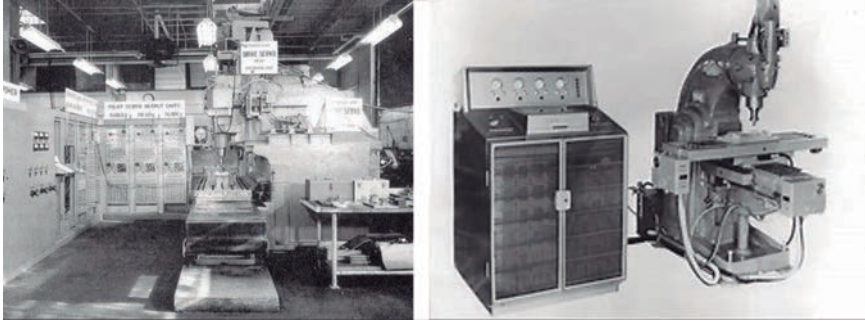


Figura 39: Izda. La máquina de NC del MIT. Dcha.= la primera máquina herramienta NC fabricada en Europa por CVA Ltd. en 1953.

4342:1985 *Numerical control of machines-NC processor input-Basic part program reference language*). Hay que reconocer que como lenguaje de programación deja estupefactos por su primitivismo a los jóvenes educados en Pascal, C++ o Python. Como profesor indicar que se hace duro enseñar a los jóvenes que la realidad industrial, la tradición y la cultura ya generada en las empresas posee una gran inercia, que solo se puede alterar por un cambio que realmente revolucione y otorgue muchos beneficios a un problema concreto. Por tanto, hay códigos G para unos cuantos años todavía por venir, aunque muchos fabricantes de controles ofrecen métodos de programación alternativos.

Por lo general, el usuario puede seleccionar el proveedor de CNC y de los variadores de velocidad de los accionamientos. Sin embargo, es tendencia que muchos fabricantes de máquinas cierren posibilidades en cuanto a marca y modelo de CNC para una máquina en concreto, dado que la complejidad de integración de los CNC a las máquinas ha aumentado. Por otra parte, los grandes fabricantes de máquinas bajo catálogo suelen firmar un acuerdo con un proveedor de hardware para desarrollar CNCs específicos para sus máquinas, que se comercializan con la marca de la empresa de máquina herramienta.

En cambio, en grandes máquinas se intenta ser flexible con respecto a los deseos del usuario, y así ofrecer por parte del fabricante de máquinas varias opciones de CNC es un factor competitivo importante. Hay sectores y empresas donde una marca de CNC tiene claramente una posición de dominio, y no se puede perder una venta por no adaptarse a la petición de un determinado control numérico.

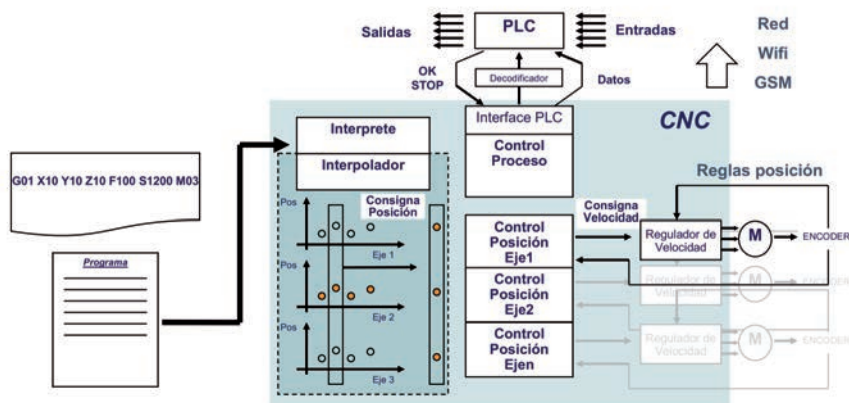


Figura 40: Funciones básicas del CNC, en una máquina de 3 ejes o n ejes.

Los fabricantes de CNCs son pocos hoy día, destacando Fanuc®, Siemens®, Heidenhain®, Mitsubishi® y la empresa nacional Fagor Automation®, y en menor medida Fidia®, Num®, o fabricantes que ofrecen su hardware a terceros.

Las funciones básicas del CNC se muestran en la figura 40, particularizadas aquí para una máquina de n ejes. Con más detalle:

- Sistema operativo básico: todos los controles actuales se basan en una arquitectura de microprocesador similar a un PC, por lo tanto, necesitan un sistema operativo básico.
- Traductor de programas: la pieza se programa en código ISO (llamado código G) o en un lenguaje NC ofrecido por el proveedor. El primero es útil para aprender cómo usar las máquinas, pero es demasiado simple para las nuevas capacidades de algunas de ellas; por eso los fabricantes de CNC han desarrollado sus variantes al mismo. En todos los casos es un lenguaje interpretado, el traductor lee bastantes bloques por adelantado para dar tiempo a realizar los cálculos de trayectoria antes de que la herramienta alcance las siguientes posiciones. Cuanto mayor sea la velocidad de avance de la máquina, más bloques deben procesarse por adelantado.
- Interpolador: ésta es la función más inteligente del CNC, dado que se deben convertir las trayectorias de 3D (3 ejes cartesianos) o 5D (generalmente tres traslaciones y dos orientaciones) del punto de referencia de la herramienta (TCP) a las posiciones de los ejes. La alta precisión requerida obliga a realizar cálculos

- cada pocos micrómetros a lo largo de la trayectoria de herramienta. Los métodos de cálculo se fundamentan en transformaciones espaciales que utilizan matrices homogéneas, compensación del radio de la herramienta y otras correcciones geométricas que dependen de la cinemática particular de una máquina.
- Control de ejes: cuando ya el interpolador ha obtenido la posición a alcanzar en cada eje, también se obtiene la velocidad de cada motor de eje. El valor de velocidad es el valor de consigna para el accionamiento del motor. A través de técnicas de control, siendo la más simple la PDI (proporcional-integral-derivativo), el movimiento en cada eje se mantiene hasta que las posiciones deseadas y reales coinciden. Por lo tanto, debe haber un dispositivo de medición de posición en cada grado de libertad o eje, un codificador o una escala lineal que se muestra en la figura 40 y anteriormente en la 36, para conocer la posición real del eje en cualquier momento dado.
 - Interfaz de usuario: actualmente es un factor importante de venta por la alta complejidad de las máquinas y operaciones a realizar. Los usuarios necesitan utilidades de asistencia en línea para evitar errores en los programas. En la figura 41 se muestran dos pupitres de CNC. Por otro lado, las máquinas para aplicaciones especiales, como afiladoras de herramientas o generadoras de engranajes, o las nuevas máquinas multitarea, requieren utilidades de específicas de programación para piezas complejas.
 - La tendencia en algunas marcas es hacia entornos similares a las tabletas o *ipads*, generando aplicaciones tipo apps para las funciones del CNC que pueden ayudar a los operarios.
 - El Controlador Lógico Programable (PLC) se incluye en la misma arquitectura de hardware que el resto de las tarjetas de control. El autómatas controla las funciones auxiliares de la máquina (generalmente codificadas como funciones M en ISO), ejecutando repetidamente un programa implementado por el fabricante de la máquina y teniendo en cuenta el valor de las entradas digitales recopiladas de sensores colocados en la máquina. Las salidas digitales del PLC están conectadas a interruptores o electroválvulas, para controlar diversos sistemas como son los almacenes de herramientas, el circuito de refrigerante, el sistema de transferencia de pallets y otros dispositivos



Figura 41: Dos ejemplos e interfaces de CNC avanzados: Izda.) Solución de Fagor® Automation, Web Technology-based HMI. Dcha.) Aspecto de los CNCs de DMG-Mori®.

auxiliares. Otra función de supervisión importante por parte del PLC es la relacionada con los interruptores de fin de carrera, ubicados en los extremos de todas las guías para evitar que los componentes móviles se salgan de sus cursos: cuando un micro interruptor detecta que un componente deslizante está en un fin de carrera, el PLC detiene inmediatamente el motor de avance del eje.

- Comunicaciones con el exterior: la comunicación vía cable y Ethernet es una opción habitual, también existe integración de mensajería SMS para indicar al usuario alarmas o estados de la máquina. Actualmente desde el CNC y el PLC se controlan y coordinan los dispositivos de la automatización local del entorno de la célula de fabricación, utilizando buses de campo. Para conectarse con los sistemas globales de supervisión de las plantas se emplean redes locales, la opción *WIFI* está en auge, y ya en el CFAA una máquina se conectó en pruebas a 5G en 2019, y se abre aquí un nuevo mundo de posibilidades.

En la actualidad, cada fabricante de controles produce dos o tres plataformas básicas de CNCs con las opciones típicas para diferentes tipos de máquinas. Tras su recepción, el fabricante de la máquina herramienta debe adaptarlos a cada modelo de máquina, siguiendo varios pasos:

- Definición de los ejes de la máquina en relación con los del software que ejecuta internamente el CNC, especificando los senti-

dos positivos y negativos, los recorridos de cada eje y la estructura cinemática de la máquina.

- Los parámetros de control de cada eje deben ajustarse a la dinámica de la máquina; éste es un campo clásico de la teoría de control.
- Programación del PLC para cada modelo de máquina, junto con sus opciones de usuario.

Actualmente en el campo comercial casi no se hace referencia al hardware del CNC, como sí se hacía hace quince años, dado que el potencial del hardware excede la necesidad de una sola máquina

7.7 Carenados

El tradicional color verde reseda (RAL 6011) está en desuso en las máquinas de mayor complejidad. Con idea de conseguir imagen de marca y mostrar nivel tecnológico, los carenados de las máquinas herramienta han pasado a presentar bonitos colores, siendo tendencia los grises antracita, azules, fucsia, rojos, blancos. La estética se cuida; así en la figura 42 se muestra una máquina premiada por su diseño, estilismo y por su funcionalidad.

El carenado realiza una triple función de protección:

- Protege a los operarios de los movimientos de los órganos móviles. En caso de rotura de la herramienta o que una pieza se suelte, el carenado protege del impacto. Se suele utilizar una composición de chapa de acero, vidrio de seguridad y policarbonato.
- Por otra parte, debe impedir que salpicaduras de taladrinas o nieblas puedan diseminarse por los alrededores de la máquina. Los modernos sistemas de visionado tipo ventana rotativa permiten contemplar la zona de corte sin verse ocluido por los chorros de taladrina. Estas ventanas circulares (ver figura 42), giran gracias a un flujo neumático a una velocidad en que los líquidos y los residuos se mantienen alejados por efecto de la fuerza centrífuga.
- Por último, el carenado puede incluir escalones, escaleras o plataformas que ayudan al operario cuando accede a colocar o verificar piezas y herramientas.

El carenado debe integrar la estructura de la máquina y los sistemas de extracción de viruta y recogida de los fluidos de corte. En el



Figura 42: Izda. El último premio de diseño en la Bial 2022 a la empresa Zayer®. Dcha. Sistema de ventana giratoria para poder ver en mecanizado con taladrina.

interior se ubica una zona de trabajo estanca donde los refrigerantes caen a un depósito de recogida de acero inoxidable.

La ubicación del panel de control del CNC dependerá del tamaño de la máquina, estando colgados de brazos articulados en máquina grandes, pupitres móviles en otros casos, o siendo integrados rigidamente en los paneles frontales en las máquinas pequeñas.

Muchos elementos de seguridad de la máquina se materializan gracias a dispositivos y sensores ubicados en los carenados y en las puertas. Todas las máquinas y equipos de trabajo nuevos deberán disponer de marcado y declaración de conformidad CE. Este requisito se aplica en: a) todas las máquinas nuevas, aunque no presenten riesgo para la seguridad de los usuarios, o b) todas las de fabricación propia, aunque no se comercialicen, o c) cuando se monten máquinas o partes de máquinas de origen diferente. Los equipos fabricados antes del 1 de enero de 1995 que no dispongan de marcado CE, deben acondicionarse en conformidad con arreglo al Real Decreto 1215/1997.

Los riesgos más comunes a prevenir son:

- Contacto accidental con la herramienta o la pieza en movimiento.
- Atrapamiento con los órganos en movimiento de la máquina.
- Heridas por proyección de la pieza o de la herramienta fuera de la zona de trabajo.
- Dermatitis por contacto con los fluidos de corte utilizados como refrigerantes. Los líquidos de corte pueden producir más de cien enfermedades diferentes.

En toda máquina herramienta y sistema industrial se repite la tradicional seta roja de emergencia, una parada de *categoría 0*, es decir, supresión inmediata de la energía de los accionamientos de la máquina en caso de ser pulsada. También las máquinas incorporan semáforos para que desde la distancia se pueda distinguir su estado: funcionando, parada o requiriendo alguna acción del operario.

Este académico que aquí les habla ha conocido accidentes en el entorno de las máquinas herramienta. Por este motivo indicar que, si bien los esfuerzos que se hacen en prevención son muy intensos, el riesgo siempre existe y nunca debe bajarse la guardia.

8. VERIFICACIÓN Y AJUSTE DE LA MÁQUINA

En los años 1980s se dio a conocer el resultado de un grupo de expertos enrolados en el grupo *Machine Tool Task force* [Hocken, 1980], y a partir de entonces empezaron a tomar forma los métodos de calibración y estandarización de los ensayos de precisión de máquina herramienta, que prosiguieron en los trabajos de M. Weck [Weck, 1984].

Tras la construcción y montaje de una máquina se debe realizar una verificación exhaustiva de la precisión y del rendimiento. Para ello, se han definido algunas pruebas para ajustar mecánicamente en primer lugar, y determinar y ajustar los parámetros de compensación que aplicará el CNC para controlar los ejes de la máquina en segundo lugar. Las pruebas también se pueden utilizar para otros propósitos, como pruebas de aceptación de los compradores de máquinas, o pruebas para comparar máquinas similares. También es habitual proponer pruebas y test para verificar periódicamente la máquina durante su vida útil y así poder recalibrar los parámetros de control de una máquina concreta.

Se pueden mencionar tres tipos de pruebas.

En primer lugar, las pruebas geométricas para medir errores de rectitud y paralelismo. Las normas ISO 230:2006, ISO 10791:1998, ISO 13041:2004 y otras normas definidas por el *Comité Técnico ISO 39/SC 2 (Condiciones de prueba para máquinas herramienta de corte de metales)* especifican métodos para evaluar la precisión y repetibilidad de posicionamiento de los ejes en máquinas de control numérico mediante la medición directa de cada eje. En las normas se sugieren métodos tanto para ejes lineales como rotativos. Hoy existen sistemas que uti-

lizan interferometría láser, e incluso utilizan varios haces láser para medir hasta seis grados de libertad en una sola configuración, como se muestra en la figura 43, lo que redunda en un menor tiempo de inspección.

El segundo grupo incluye procedimientos para estudiar el control de interpolación o movimiento sincronizado de dos ejes o más, basados en a) interferómetros láser como sensores de posición para medir la repetibilidad de la máquina, y b) el dispositivo “Ball-Bar”. Este último es un sensor lineal telescópico de alta precisión con bolas en sus extremos para estudiar el movimiento relativo de dos ejes cartesianos utilizando un movimiento circular. Cuando se consideran simultáneamente varios ejes de rotación no hay pruebas estándar, excepto para cabezales birrotativos.

Otro dato importante para lograr la mejor adaptación entre la máquina y su CNC es la medición del error de retardo en los lazos de control, utilizando las utilidades internas implementadas en los controles modernos para monitorizar el comportamiento de los accionamientos en relación a las posiciones de los ejes.

Un último grupo incluye las “piezas de prueba” para verificar el comportamiento de tornos y fresadoras durante el proceso de mecanizado [Archenti y Laspas, 2019]. Actualmente, se centran mayoritariamente en centros de fresado de tres ejes (ver figura 44 Izda.). La más conocida es la pieza de trabajo NAS-979 (definida en 1969 y adoptada en ISO 10791-7:2020 *Test conditions for machining centres Part 7: Accuracy of finished test pieces*).

La normativa comienza a incluir piezas específicas para probar centros de mecanizado de cinco ejes, pero incluso así muchos usuarios definen sus propias pruebas para verificar la máquina que in-

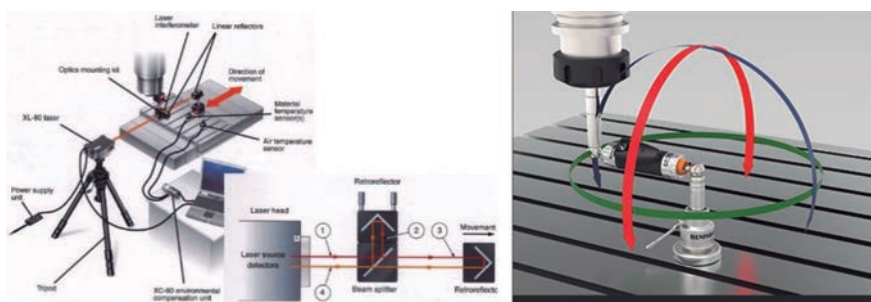


Figura 43: Izda. Sistema Renishaw® XM-60 de interferometría para estudio de rectitud de ejes de forma simultánea. Dcha. Sistema de ball-bar Renishaw QC20.

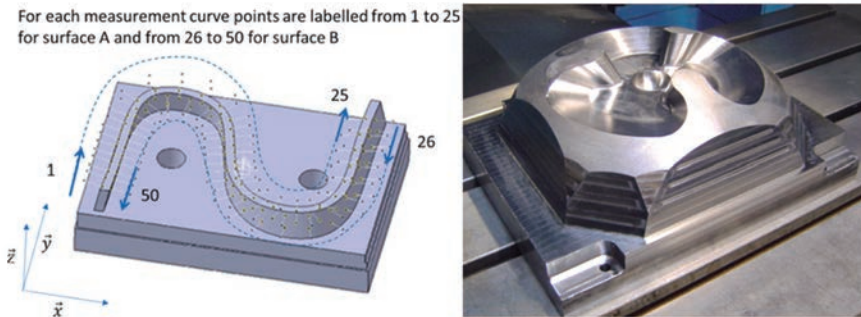


Figura 44: Izda. La medición de la pieza en forma de S se realiza en cien puntos distribuidos igualmente en cuatro curvas en la superficie A y dos curvas B a dos alturas diferentes. Dcha. Pieza que surgió del proyecto PRAXIS, que propuso la Universidad del País Vasco para pruebas en el sector del molde.

tentan comprar, lo que requiere mucho tiempo de pruebas antes de una venta y su coste asociado. La figura 44 (Dcha.) muestra una pieza que se propuso en 2007 para el mundo del molde en fresado en cinco ejes. Incorporaba todas las operaciones típicas del molde, el acero era de dureza 45 HRC, y era fácil de medir en una máquina de medir por coordenadas. Incluso el tamaño de su base se correspondía con la clásica mesa dinamométrica disponible (por Kistler®); sin embargo no tuvo el éxito esperado, dado que se necesita una empresa líder, bien sea cliente o fabricante de máquinas, para imponer un estándar de facto. Esta forma de hacer puede más tarde llegar a convertirse en un estándar de derecho, mejorado y admitido por ISO.

En los concursos para adquirir grandes máquinas, el cliente suele exigir en sus pliegos de condiciones el mecanizado de una pieza representativa o que incluya los principales problemas de las piezas presentes y venideras; “ver es creer” se aplica en este campo tan realista del mecanizado.

Calibración y normas

El Vocabulario Internacional de Metrología (VIM)² define que la calibración es una “operación que bajo condiciones especificadas establece, en una primera etapa, una relación entre los valores y sus incertidumbres de medida asociadas obtenidas a partir de los pa-

² Definido por la organización Internacional de Metrología Legal (OIML) y el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM).

trones de medida, y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas y, en una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación". Parece más claro definir que la calibración es el proceso de comparar los valores obtenidos por un instrumento de medición con la medida correspondiente de un patrón de referencia.

Como se ha indicado en el apartado anterior y tras los esfuerzos iniciados en los años 1980s, la norma ISO 230-2:2012 *Test code for machine tools* es probablemente la más aceptada en el campo de la máquina herramienta, aunque también son de aplicación en Japón la JIS B6201-1993 y en América ASME B5.54 2005: *Methods for performance evaluation of computer numerically controlled machining centers*. Los ensayos según la norma ISO 230-2 se basan en las siguientes premisas.

- Temperatura uniforme: todos los ensayos deben realizarse en un ambiente controlado de 20 °C, denominada *room temperature*.
- Ciclo de calentamiento: todas las pruebas incluyen un ciclo de calentamiento que simula las condiciones de trabajo de la máquina. Otras normas no incluyen calentamiento, por lo que no pueden detectarse los errores causados por las fuentes de calor.
- Enfoques unidireccionales y bidireccionales: todas las pruebas incluyen aproximaciones unidireccionales y bidireccionales a los puntos objetivos. La precisión unidireccional es significativamente mejor que la de los resultados bidireccionales porque no se ven influidas por los errores debidos al juego de los husillos de bolas. La forma bidireccional es la condición real y el valor útil para el usuario de la máquina.
- Número de puntos objetivo: los ejes lineales requieren al menos 5 puntos de control por metro y los ejes rotativos requieren al menos 3 puntos de control por cada 90 grados.
- Número de mediciones por punto objetivo: cada prueba requiere al menos 5 ensayos por punto objetivo y por dirección de aproximación, lo que permite calcular bandas de error estadísticas. La banda de error en ISO 230-2 es ± 2 veces la desviación típica de las mediciones.

La distancia entre puntos objetivo debe ser diferente y no uniforme. El error de posicionamiento para un punto objetivo i y una prueba j se define como X_{ij} . La norma distingue entre las aproxi-

maciones unidireccionales en sentido positivo y negativo definiendo $X_{ij}\uparrow$ y $X_{ij}\downarrow$. Si se seleccionan m puntos objetivo y se realizan n pruebas para cada punto objetivo, el valor medio de los errores de posición se calcula como:

$$\bar{x}_i \uparrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \uparrow \quad \text{y} \quad \bar{x}_i \downarrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \downarrow \quad (8.1)$$

La desviación bidireccional se calcula como el valor medio entre los errores de posición unidireccionales:

$$\bar{x}_i = \frac{\bar{x}_i \uparrow + \bar{x}_i \downarrow}{2} \quad (8.2)$$

El error debido a la inversión del movimiento entre aproximación positiva y negativa se mide como:

$$B_i = \bar{x}_i \uparrow + \bar{x}_i \downarrow \quad (8.3)$$

Por otra parte, las desviaciones típicas para cada punto objetivo pueden calcularse como:

$$\begin{aligned} s_i \uparrow &= \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} \uparrow - \bar{x}_i \uparrow)^2 \\ s_i \downarrow &= \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} \downarrow - \bar{x}_i \downarrow)^2 \end{aligned} \quad (8.4)$$

La norma ISO 230-2 utiliza una banda de error ± 2 veces la desviación estándar, por lo que la repetibilidad para una prueba unidireccional para cada punto objetivo es $R_i \uparrow = 4s_i \uparrow$ y $R_i \downarrow = 4s_i \downarrow$. La repetibilidad para el enfoque bidireccional es ligeramente más compleja de calcular:

$$R_i = \max(2 \cdot s_i \uparrow + 2 \cdot s_i \downarrow + |B_i|; R_i \uparrow; R_i \downarrow) \quad (8.5)$$

Por tanto, la repetibilidad del eje de la máquina herramienta (R) se calcula como la repetibilidad máxima de cada punto objetivo:

$$\begin{aligned} R \uparrow &= \max(R_i \uparrow) \\ R \downarrow &= \max(R_i \downarrow) \\ R &= \max(R_i) \end{aligned} \quad (8.6)$$

La precisión del eje de la máquina también se define con una banda de error de 2σ y se determina mediante las siguientes ecuaciones:

$$A \uparrow = \max(\bar{x}_i \uparrow + 2 \cdot s_i \uparrow) - \min(\bar{x}_i \uparrow - 2 \cdot s_i \uparrow) \tag{8.7}$$

$$A \downarrow = \max(\bar{x}_i \downarrow + 2 \cdot s_i \downarrow) - \min(\bar{x}_i \downarrow - 2 \cdot s_i \downarrow)$$

$$A \uparrow = \max(\bar{x}_i \uparrow + 2 \cdot s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow + 2 \cdot s_i \downarrow) - \min(\bar{x}_i \uparrow - 2 \cdot s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow - 2 \cdot s_i \downarrow)$$

La figura 45 representa la precisión y la repetibilidad para los ensayos unidireccionales y bidireccionales definidos en ISO 230-2. Los puntos objetivo se separan de forma no uniforme y las mediciones se realizan tanto en sentido positivo como negativo. Una vez calculado cada error de posición, se evalúa la precisión y la repetibilidad para cada ensayo unidireccional. La banda de error se calcula con el criterio 2σ . Finalmente, combinando el resultado de ambas direcciones, se calcula la precisión y repetibilidad del eje de la máquina herramienta.

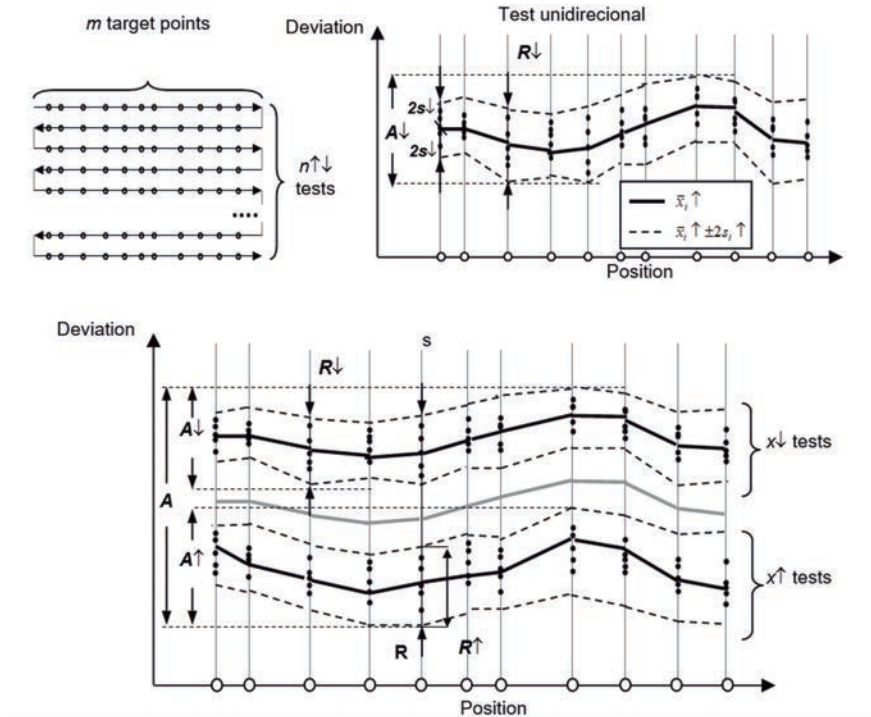


Figura 45: Precisión y la repetibilidad según el procedimiento normalizado ISO 230-2 para ensayos unidireccionales y bidireccionales [López de Lacalle y Lamikiz, 2009].

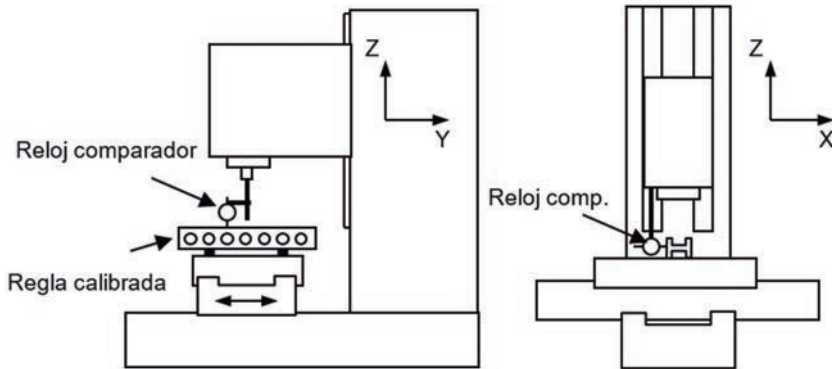


Figura 46: Ensayo de rectitud del eje Y de un centro de mecanizado vertical, según la norma ISO 10791-2.

La norma industrial japonesa JIS B6201 presenta un cálculo menos estadístico de precisión y repetibilidad. Las pruebas de cada eje se basan en dos puntos finales y el punto medio de la carrera del eje. El movimiento de aproximación es sólo en una dirección, la posición real del eje se mide utilizando un interferómetro láser y se compara con la lectura posicional del CNC. El error es la diferencia entre ambos valores. La precisión se mide con el máximo de los tres errores de posicionamiento, calculado como $\pm \frac{1}{2}$ error de posicionamiento. Del mismo modo, el valor de repetibilidad se mide con una serie de pruebas para cada punto de referencia. Deben realizarse al menos siete aproximaciones para cada punto objetivo. Considerando que sólo hay tres puntos objetivo, la repetibilidad se calcula con 21 mediciones y se define con $\pm \frac{1}{2}$ el valor máximo de repetibilidad medido en uno de los tres puntos objetivo.

Los resultados de la norma ISO son más representativos en términos de precisión real de la máquina ya que los errores suelen seguir una distribución estadística.

La norma ISO 230 es la guía general para otras que definen ensayos específicos para cada tipo de máquina. Así, la norma ISO 230-1 describe los conceptos generales de rectitud, redondez y perpendicularidad. La norma ISO 230-2, como se ha descrito anteriormente, define la medición de la precisión y repetibilidad. Existen diferentes normas ISO para tornos CNC (ISO 13041), centros de mecanizado (ISO 10791), fresadoras de puente (ISO 8636), máquinas de electroerosión por hilo (ISO 14137), máquinas de electroerosión por pene-

tración (ISO 11090), rectificadoras verticales (ISO 1985) y otros tipos de máquinas. Como ejemplo, la figura 46 muestra la medición de la rectitud del eje Y para un centro de mecanizado vertical, siguiendo los principios de ISO 10791-2. La rectitud se mide en dos planos perpendiculares (YZ y XZ). En este caso, los ensayos se realizan con una regla calibrada y un reloj comparador.

Los ensayos de posicionamiento propuestos miden los ejes de la máquina por separado, solo definen algunos resultados parciales para la interpolación de dos ejes, como la perpendicularidad o la concentricidad del eje giratorio, pero no dan información sobre las capacidades de contorneado de la máquina. Por este motivo, además de las normas, un segundo grupo de pruebas incluye algunos procedimientos semiestándar (muy utilizados) para medir los errores de interpolación del contorneado.

En este grupo, uno de los ensayos más extendidos es el ya mencionado *Ball-Bar*. Fue desarrollado a mediados de los años 80 por J. Bryan para los Laboratorios Livermore, para probar tornos de alta precisión. Desde finales de los 80, los Comités ASME B5 e ISO 230 lo incluyen entre los instrumentos recomendados para realizar pruebas de verificación.

El dispositivo ball-bar (figura 43) es esencialmente un transductor de desplazamiento ubicado en un brazo telescópico sostenido entre dos esferas. Las esferas se colocan en la mesa de la máquina y en la punta del husillo. La prueba típica consiste en ejecutar una interpolación circular de la mesa de la máquina herramienta con respecto al husillo (o viceversa). Teóricamente si se ejecuta un movimiento circular perfecto, la distancia entre las dos esferas permanecería constante y el transductor no detectaría ningún desplazamiento. Pero en la realidad existen desviaciones de la trayectoria debidas a varias causas, como la falta de rectitud y perpendicularidad entre los dos ejes interpolados, la holgura de los husillos de bolas, los errores de interpolación del CNC, los efectos de *stick-slip* en las guías, etc. En los gráficos obtenidos se utiliza una referencia polar muy intuitiva. Es además una prueba rápida que tarda unos 15 minutos, donde pueden detectarse muchas fuentes de error simultáneamente. La figura 47 muestra un diagrama polar y algunos errores en la interpolación en dos ejes de una fresadora, como pueden ser el juego de los tornillos en los cambios de dirección, errores de interpolación, etc.

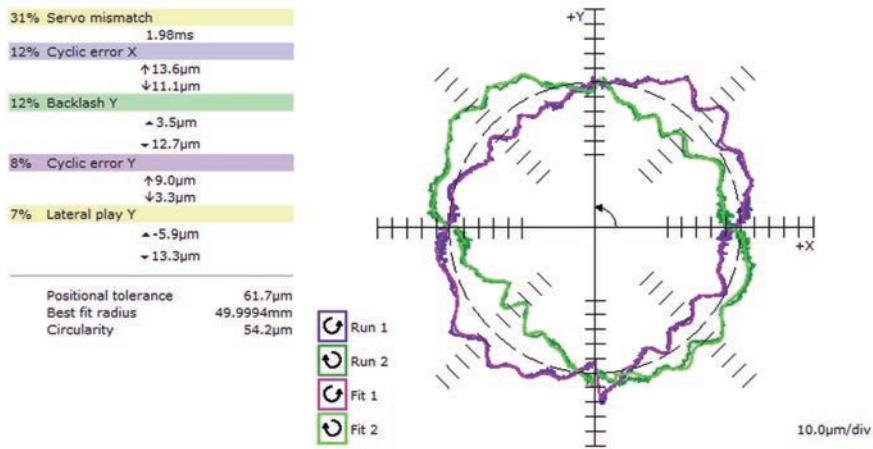


Figura 47: Diagrama polar del Ball-Bar, y algunos errores detectados.

Como sucede en muchos campos de la técnica, las normas de calibración van algo por detrás de los avances en diseño y montaje, pero constituyen una base para poder verificar una máquina herramienta. Por otra parte, como se deduce de varios de los conceptos hasta ahora desarrollados, una máquina nunca podría producir con una incertidumbre menor a su repetibilidad. Para mejorar los valores posibles, se necesitan sistemas de medida o control adicionales, y la intervención del ser humano en el ajuste y corrección.

En relación a los últimos avances, se ha logrado la medición simultánea de error de varios grados de libertad por el sistema Renishaw® XM60 mostrado en la figura 43. En este sistema, desde la unidad de lanzamiento salen cuatro rayos láser y un rayo LED. Los rayos láser se emplean para la medición simultánea de errores lineales, de cabeceo y de orientación basados en interferometría láser, cuyas especificaciones son similares a las del interferómetro láser de tipo convencional; el haz LED se emplea para medir simultáneamente la rectitud y los movimientos de error de balanceo.

La verificación de cabezales birrotativos ha obligado a desarrollar sistemas de calibración, como son el HMS (*Head Measuring System*) de Fidia®, ICAL NX de Zayer®, o Accura Heads de Soraluze®.

También han surgido sistemas como el Laser-bar Etalon® X-AX, que utiliza una barra telescópica que guía un láser interferométrico. Este sistema puede ser utilizado en máquinas de 5 ejes y verificar las

desviaciones geométricas como rectitud, errores angulares, posicionamiento, etc. hasta una longitud de 1,5 m.

Esta empresa también desarrolló el *Laser-tracer*. Se trata de un interferómetro láser de seguimiento automático que sigue automáticamente un reflector y permite identificar desviaciones geométricas; con un solo emisor debe repetirse las secuencias con el elemento en varias posiciones. Para aplicaciones que requieren mayor precisión espacial se utilizan cuatro tracers acoplados electrónicamente, formando un sistema de “multilateración” en tiempo real. La multilateración implica que si se conoce la distancia de un punto a otros tres puntos conocidos, entonces se pueden determinar sus coordenadas; más puntos de referencia implican un cálculo con menor incertidumbre.

Los últimos avances en verificación de máquinas se recogen en la excelente revisión [Gao et al., 2023], publicada en la revista *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, la de mayor impacto del sector y de las más altas en el campo de la Ingeniería mecánica.

9. Y LLEGARON LAS MÁQUINAS MULTIEJE Y MULTITAREA

Una máquina multitarea es aquella en que las funciones de trabajo sobre piezas prismáticas, típicas de fresadoras y centros de mecanizado, se ejecutan al mismo nivel de importancia que las funciones propias de un torno, es decir, el trabajo sobre pieza cilíndrica.

Podríamos afirmar que hasta los 2000s la frontera entre los conceptos de torno y fresadora estaba bien definida, salvo algún caso como fue la Voest Alpine® WNC 500S (más tarde M55 Millturn) que se anticipó algunos años, ver figura 48 (Izda.). Sin embargo, en la feria de Hannover y otras a partir del 2000 se empezaron a mostrar al mercado un número creciente de máquinas multitarea. Desde entonces y feria tras feria, los visitantes que las contemplan en los stands de los expositores discuten si se trata de un torno que ha evolucionado a fresadora, o viceversa. Por otra parte, en esta década hubo un estancamiento de la carrera tecnológica por el fresado a alta velocidad; esta tecnología ya se consideraba madura y el estado del arte de herramientas no justificaba el seguir subiendo la velocidad de corte como objetivo. La idea de alta velocidad había dominado el panorama de evolución del mecanizado en las dos últimas décadas del

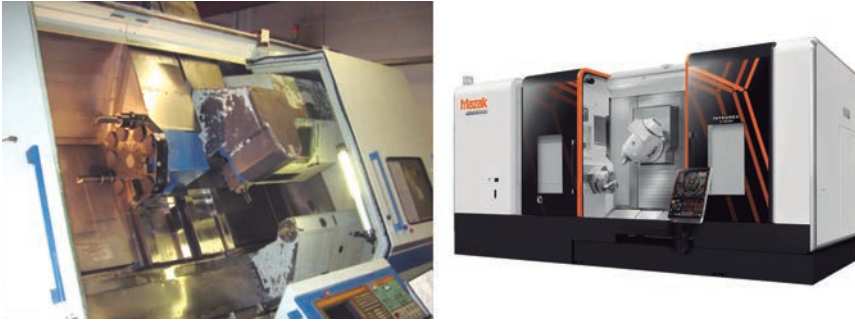


Figura 48: Izda. Modelo WNC 500S (más tarde M55 Millturn).
Dcha. Máquina del 2023 Mazak® Integrex e-500H.

siglo XX, incluyendo tanto la producción científica como el desarrollo de máquinas; al comienzo de este siglo el rumbo cambió hacia el concepto de multitarea.

Para llegar a desarrollar tanto tecnológica como económicamente estas máquinas, debieron suceder varios desarrollos de forma simultánea:

- En primer lugar, el desarrollo de los motores huecos o de par, que permiten incluir los motores en los paquetes de rodamientos en ejes rotativos. Los denominados “*torque motors*” son motores síncronos de imanes permanentes sin escobillas de transmisión directa; la carga útil está conectada directamente al rotor sin el uso de elementos de transmisión, su aspecto y aplicación se muestra en la figura 49 para una mesa (cuna) de dos ejes rotativos.
- En segundo lugar, mejoraron los sistemas de bloqueo de los cabezales de fresar y electrohusillos. El bloqueo permite fijar la posición del cabezal y así colocar las herramientas de torno en ángulos fijos, con gran rigidez.
- La doble función del accionamiento principal de los tornos, que a) puede trabajar como eje de trabajo, imponiendo velocidad y par para girar la pieza a alta velocidad, pero b) también como eje vivo, controlando y sincronizando la posición del eje C.
- Incorporación de mayor número de grados de libertad en la máquina. Los ejes pueden sincronizarse o interpolarse en subconjuntos denominados canales. Por tanto, las máquinas multitarea son multieje. Y muchas fresadoras de 5 ejes son también máquinas multitarea porque los ejes rotativos de las mesas de trabajo (eje C) pueden ofrecer par suficiente para torneear.

- La potencia de los modernos CNC permite controlar los canales de forma independiente y coordinada, y por otra parte ayudar al usuario a realizar los programas.
- Introducción de sistemas de palpado de pieza o herramienta dentro de la máquina, que pueden comprobar que se han realizado las operaciones previas dentro de unas tolerancias satisfactorias. La metrología *in-process* ha evolucionado desde sondas de medición puntual hasta las sondas tipo Renishaw® Sprint que pueden escanear en continuo la geometría de toda una pieza.

Al esfuerzo tecnológico se sumaron los fabricantes de accesorios, aportando intercambiadores de herramienta más rápidos, o intercambiadores de piezas. También se sumaron los fabricantes de herramientas de corte y portaherramientas, generando el concepto de herramienta multi-torreta, o definiendo el estándar de acople poligonal (ISO 26623-1:2014) muy común en este tipo de máquinas (ver apartado 4.2).

La programación en el ordenador de las operaciones de mecanizado, el denominado CAM, ha facilitado el uso de estas máquinas, incorporando funciones específicas para ellas, como por ejemplo la simulación del conjunto máquina-proceso y la detección de colisiones entre herramienta y pieza, entre otras. El concepto actual de CAM (*Computer Aided Manufacturing*) es el de un paquete de software que permite generar las trayectorias de mecanizado utilizando un modelo tridimensional de la pieza objetivo, con funciones que permiten al programador generar las trayectorias del TCP sobre la superficie. El programa debe luego traducirse a una máquina y CNC concreto, lo que se denomina *postprocesado*. Y cuando el programa de CNC ya

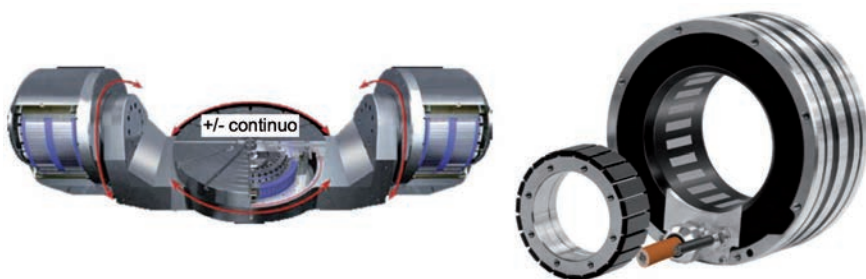


Figura 49: Izda. Mesa de cuna basculante de dos ejes con motores de par.
Dcha. Imagen de los motores de par huecos.

generado va a ejecutarse en la máquina, el operario debe definir la ubicación de la pieza en bruto en la zona de trabajo (poner el cero).

Podríamos decir que a fecha 2024, el CAM se reconoce como el centro de gravedad y decisión en el mecanizado de componentes complejos [López de Lacalle *et al.*, 2005].

La pregunta clave es por qué era y es tan interesante este concepto multitarea de dos máquinas en una. En el planteamiento de la pregunta está parte de la respuesta: es adquirir dos máquinas en una, lo que otorga mucha versatilidad a los talleres que trabajan por subcontratación para sectores diversos.

Pero también es idea clave que todos los programas de mecanizado utilizan la misma referencia de pieza, los programas se ejecutan sucesivamente sin soltar/amarrar la pieza. Cualquier balance de incertidumbre en mecanizado, así se explicó en la sección 6, deja patente que la mayor fuente de incertidumbre o error es el cambio de cero entre una máquina y la siguiente. Colocar una pieza en la mesa de trabajo, amarrarla y definir el *cero de pieza* para que el programa NC sea preciso es una operación compleja, e incluso muy compleja en componentes que provienen de procesos primarios como la fundición, que implican bastante dispersión en la forma del elemento original de partida.

Desde los 2000 no hay año en que no surja una nueva función para estas máquinas, asombrando en cada feria a visitantes; es ya una tradición que se sepa de algo nuevo por la cantidad de espectadores delante de cada máquina mostrada, en eso el mecanizado no es diferente a otros campos del saber humano, y lo nuevo atrae, asombra e inculca cierto temor. Así en las demostraciones de la capacidad de las máquinas, en una *sola atada* (cómo se suele decir) de un eje forjado en bruto puede surgir todo un tren de aterrizaje, o un cigüeñal de motor marino, casi una carcasa de turbina, una prótesis, etc., piezas de elevado valor añadido. Incluso se pueden fabricar engranajes complejos tipo espiro cónicos; por citar un nuevo proceso posibilitado por estas máquinas, el *power skiving* que es ejecutado en fresadoras y máquinas multitarea mediante un perfecto sincronismo del giro de la herramienta y pieza, siguiendo un proceso de generación cinemática.

La figura 50 muestra varias de las operaciones posibles en estas máquinas, fresado, torneado, rectificado, generación de engranajes por fresa madre, y medida.

Actualmente hay pocos límites tecnológicos no resolubles al pensar en nuevas configuraciones híbridas, y la mente de los diseñados-

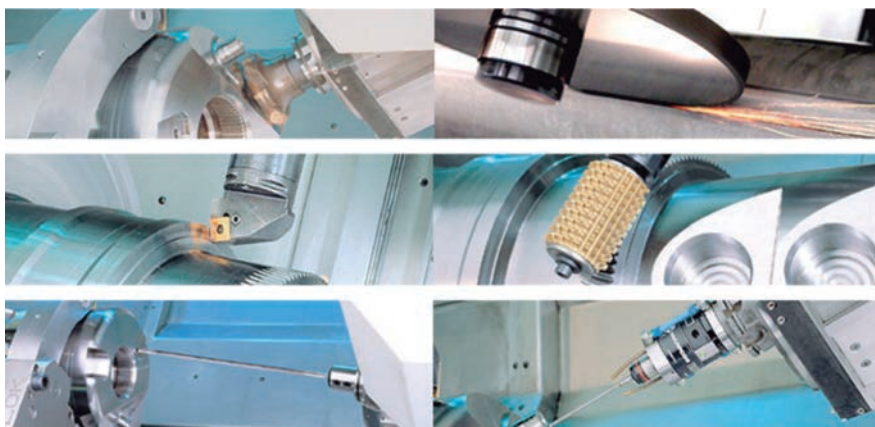


Figura 50: Operaciones posibles en una WFL® Millturn: fresado, rectificado, torneado, fresado de engranajes, y medida en máquina.

res ha abandonado los viejos clichés donde el mundo se dividía en tornos y fresadoras. El mundo actual es multitarea, pero los procesos de mecanizado básicos sí se mantienen y así se sigue fresando, torneando, taladrando, etc. Pero las máquinas han perdido su vinculación específica y exclusiva a un solo proceso.

Ante los nuevos avances surge un problema de nomenclatura, sobre cómo denominar a la nueva generación de máquinas herramienta. Quizás es puro academicismo, pero escribir para que los demás aprendan es parte de nuestra actividad y clasificar es inherente a cualquier intento de definir el estado de una tecnología. Es tarea sin duda compleja, pero no nos rendimos, la clasificación del libro escrito en 2009 [López de Lacalle y Lamikiz, 2009] actualizada y mostrada como tabla 3 todavía puede ser considerada vigente, y de allí ha sido traducida. Algunos tipos de máquinas son ya difíciles de encontrar en los talleres, por haberse visto superadas por las nuevas máquinas de CNC; éste podría ser el caso de cepillos puente, limadoras, punteadoras entre otras.

Resumiendo las principales definiciones de la tabla 3, en general un *centro de mecanizado* es una fresadora pequeña o mediana con cambio automático de herramientas, que realiza operaciones con herramientas rotativas. Si es de *cinco ejes* se denomina así, y muchas pueden tornear utilizando los platos de posicionamiento como movimiento de trabajo. Si la máquina es muy grande se tiende a seguir utilizando la denominación *fresadora*.

Un *centro de torneado* realiza operaciones con la pieza en rotación, pero puede realizar fresados ligeros con herramientas motorizadas, es decir, activadas desde un motor y con cadena de transmisión por engranajes, y con el control del eje C (eje del plato de garras).

Respecto a las *máquinas multitarea*, en castellano el primer término de la definición nos definirá lo más sustantivo de la plataforma de la máquina, y el segundo tomará característica de adjetivo. En español así ocurre con términos como hombre rana, perro lobo, y la misma denominación máquina herramienta. Esta forma de definir casa muy bien con la evolución de los fabricantes nacionales, que han partido de la familia de máquinas que ha sido su “cultura de la casa” y han tendido a integrar la idea de multitarea sobre las estructuras previas.

Una máquina multitarea coloca las dos formas de trabajo casi al mismo nivel, ambas de elevada potencia. Y en cuanto a subtipos, se hablaría de:

- *Torno-fresa*: bien vertical u horizontal, que parte de una estructura de torno y añade un cabezal y husillo de fresado potente, que también puede bloquearse para sostener herramientas de torno.
- *Fresa-torno*: justo al revés. En este caso las mesas rotativas incluyen motores de par para permitir el giro propio del torneado.

Sin embargo, en otros idiomas se invierte el orden de las palabras, incluso un líder multinacional ya ha optado por llamarse de una determinada forma (Millturn®), casi al revés de lo que diría un paisano en nuestro idioma al contemplar sus máquinas. Y no olvidemos que mercado y marketing no casan ni con el purismo ni academicismo, los términos se utilizan para vender y embelesar a los clientes.

Por otra parte, empiezan a existir máquinas que incorporan otros procesos diferentes al mecanizado, como son el rectificado, el aporte y recarga de material, procesos térmicos, etc. Multitarea se queda corto, se habla ya de *multiproceso*, y en algún foro se escucha la idea de “*factory in a machine*”.

La figura 51 muestra dos máquinas nacionales, una fresa-torno de Ibarria instalada en el CFAA que además puede rectificar, y una fresadora-mandrinadora de Soraluze. La primera es una fresadora de cinco ejes cuya mesa puede ofrecer par suficiente para torneado, y adicionalmente la empresa ha desarrollado ciclos para rectificar, realizar power skiving para fabricar engranajes, y otros.

En resumen, ya no hay límites en la mente de los diseñadores para satisfacer las necesidades de sus clientes, y las restricciones que impone

TABLA 3. UNA DENOMINACIÓN DE LAS MÁQUINAS HERRAMIENTA AÚN ACTUAL EN 2020
[LÓPEZ DE LACALLE ET LAMIKIZ, 2009]

Filo de corte definido (mecanizado)	Filo de corte no definido (abrasivo)
<i>Movimiento principal: traslación</i>	- Rectificado
- Brochadora	o Rectificadora Cilíndrica:
- Sierra de cinta y de vaivén	- Externa
- Cepillo Puente	- Interna
- Limadora, ranuradora	o Rectificadora plana:
<i>Movimiento principal: rotación</i>	- Frontal
- Torneado:	- Tangencial
o Torno universal	o Rectificado por puntos
o Torno vertical	o Rectificadora sin centros
o Torno revolver automático	o Rectificadora de herramientas
o Torno multihusillo	- Bruñido (honing)
- Fresado:	- Lapeadora
o Fresadora universal (en C)	o Una cara
o Fresadora vertical, horizontal	o Doble cara
- Punteadora (en desuso)	- Sierras por fricción (disco y banda)
- Mandrinadora (horizontal)	- Sierras de disco abrasivo
- Taladrado:	No convencional (erosión)
o Taladro de banco	- Electroerosión:
o Taladro radial	o Por hilo (WEDM)
o Taladro multihusillo	o Penetración (SEDM)
o Taladro revolver	- Mecanizado electroquímico (ECM)
o Taladrado profundo	- Mecanizado chorro electrones (EBM)
- Serrado:	- Mecanizado por ultrasonidos (USM) o ultrasonidos con rotación (RUM)
o Sierra circular o de disco	
Centro de mecanizado: máquina para utilizar herramientas rotativas, fresado, taladrado, roscado y mandrinado:	Laser: Esta nueva herramienta puede usarse para cortar planchas, soldar, texturizar, aportar material y ablación.
- Vertical	
- Horizontal	Máquina Multitarea: máquina que combina dos procesos:
Centro de torneado: máquina que tornea con algunas capacidades de fresado:	Fresado y torneado
- Herramientas motorizadas en torreta	o Fresa-torno
- Con cabezal de fresado y motor (en grandes tornos verticales)	o Torno-fresa
Máquinas y sistemas Transfer	Torneado y rectificado
Máquinas para generar engranajes	Fresado y rectificado
- Fresa madre, mortajado, power skiving, otros procesos de generación cinemática	Máquina híbrida: máquina que combina mecanizado y otros procesos: hoy día suele ser con sistemas de fabricación aditiva tipo DED (laser-polvo o láser hilo)

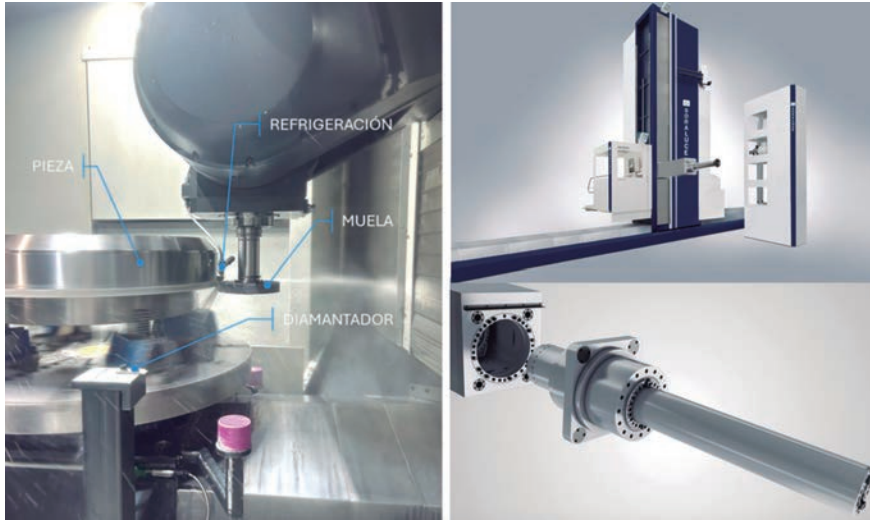


Figura 51: Máquinas multitasking: Izda. La máquina de Ibarma® THR16 con sistema de rectificado añadido en CFAA en 2024. Dcha. Fresadora-mandrinadora de Soraluze® FRX-16000 y sistema de mandrinado insertable en el cabezal.

la tecnología han sido reducidas. El fin, satisfacer una necesidad, justifica los medios, la máquina multitarea; se puede considerar algo maquiavélica esta evolución. Como decía nuestro viejo y sabio maestro de taller Eduardo: “ya no hay nada claro en este campo, todo lo clásico ha cambiado”. Le faltó añadir la frase de Cicerón, “O tempora, o mores”.

10. PROBLEMAS DE AYER Y HOY, VIBRACIONES EN EL MECANIZADO

En el diseño, montaje y uso de las máquinas herramienta siguen existiendo problemas que ya lo fueron ayer también, clásicos podríamos decir. Algunos ya se han definido en este discurso (secciones 7.2 y 8), cuando se explicaron los problemas de montaje, calibración y térmicos, incluso manifestando cierto desencanto sobre los logros alcanzados. Sin embargo, queda por tratar uno donde España posee cierta potencia, como lo demuestran los trabajos de numerosos investigadores en dinámica de máquinas: este campo es el problema de las vibraciones auto excitadas.

El problema de las vibraciones tipo *chatter* siempre ha sido una cuestión crítica en el mecanizado, así lo recogió F.W. Taylor en su

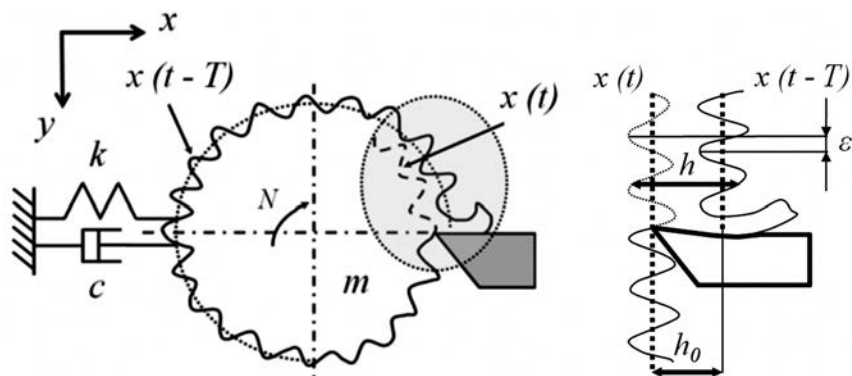


Figura 52: Efecto regenerativo entre pasadas de mecanizado.

discurso en 1907, “el más oscuro y difícil problema que afronta el mecanizador”. El chatter se define como la vibración producida por una perturbación inicial que se amplifica en el tiempo, debido a que el sistema mecánico no es capaz de absorberla, sino que la refuerza. Se da en sistemas donde existe periodicidad en la aplicación de los esfuerzos, como son muchos procesos de corte (torneado, fresado, etc.). La consecuencia es una desestabilización y una vibración cercana pero no igual a la frecuencia natural del sistema. La causa es una rigidez y amortiguamiento insuficientes, y/o la elección de unas condiciones de corte inadecuadas.

Así, el chatter puede aparecer en todos aquellos procesos donde la herramienta actúa sobre una zona donde ha eliminado viruta en un ciclo anterior, ver figura 52. La herramienta, en lugar de encontrar una superficie lisa, encuentra en el período actual (instante) una superficie ondulada y por tanto debe eliminar un espesor de viruta variable e inesperado. La nueva superficie creada en el período actual vuelve a ser ondulada y, de esta manera, la ondulación se regenera, *se autoexcita*, período a período. Así por ejemplo, para una operación de refrentado, el avance programado estático (ϕ) deja de ser constante y debe estudiarse la diferencia entre la onda actual y la de la vuelta anterior. La fuerza de corte puede alcanzar amplitudes de vibración muy fuertes, que resultan inadmisibles para el acabado superficial de la pieza. Para reducir las vibraciones, la intuición del operario le hace disminuir la velocidad de giro o la profundidad de pasada (ϕ o la anchura), lo cual puede eliminar el chatter pero conlleva una baja tasa de arranque y un bajo rendimiento de la operación.

El problema dinámico puede representarse mediante un diagrama de bloques con realimentación. El origen e inicio de la vibración relativa pieza-herramienta puede ser un punto duro en el material o una discontinuidad en la trayectoria. El sistema (ver figura 53) responde en función de sus características dinámicas cerrando y realimentando el defecto inicial, provocando un desplazamiento relativo entre pieza-herramienta. La vibración se mantiene y amplifica en el período siguiente.

El sistema se expresa matemáticamente mediante una ecuación diferencial de segundo orden con retardo (donde el retardo es precisamente el período entre dos vueltas sucesivas en torneado, o el paso entre dos dientes sucesivos en fresado). Para el caso de un sistema con 1 grado de libertad (figura 52), donde la herramienta vibra en la dirección radial :

$$m \cdot \ddot{x}(t) + c \cdot \dot{x}(t) + k \cdot x(t) = K_c \cdot b \cdot h(t) \quad (10.1)$$

donde K_c es el coeficiente de corte en la dirección de avance y donde h ya no es constante e igual al avance estático programado (h_0), sino que aparece un término adicional cuya magnitud es la diferencia entre las dos ondulaciones consecutivas externa (debida al período anterior) e interna (debida al período actual):

$$h(t) = h_0 - [x(t) - x(t - T)] \quad (10.2)$$

Las vibraciones pueden ser originadas por excitación de la máquina en procesos de desbaste, o de herramienta o pieza en los casos de alta velocidad y fresado ligero, así se muestra en la figura 54. En todos los casos la existencia de chatter conduce a daños en el sistema máquina-herramienta-pieza, pérdida de eficiencia y calidad en el corte, a fallos catastróficos de herramienta, y/o a que la pieza tenga que ser finalmente descartada por las marcas producidas.

El cálculo de la función de respuesta en frecuencia (FRF) del sistema máquina, herramienta y pieza, puede realizarse por vía analítica o por vía experimental. La primera presenta el problema de no poder determinar el amortiguamiento, que debe ser un input del modelo. Por este motivo, la vía de análisis modal experimental es el camino habitual, por lo que no es raro ver en los laboratorios a técnicos dándoles golpes a las máquinas con martillos instrumentados y colocando acelerómetros para

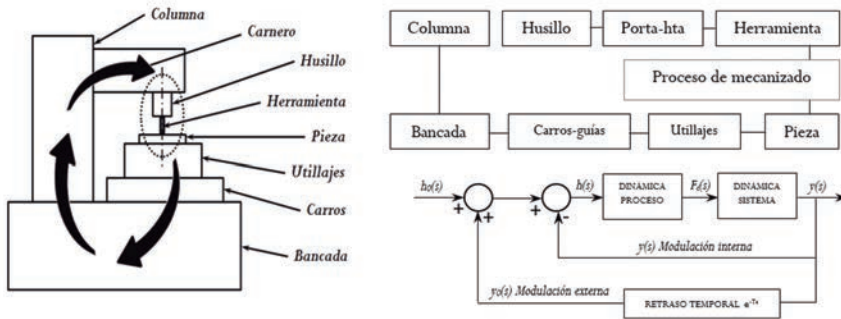


Figura 53: Lazo cerrado máquina-herramienta-pieza y diagrama de bloques para chatter regenerativo [Merrit, 1965].

determinar la respuesta en frecuencia experimental. También se ha trabajado en cómo ensamblar las respuestas FRF de los elementos independientes en los sistemas de máquina+porta y herramienta+ utillajes (Análisis de Subestructura de Acoplamiento de Receptancia-RCSA), para lo que previamente debe estudiarse cómo afectan las uniones entre estos elementos [Ealo *et al.*, 2018].

Para mitigar el chatter es clave conocer el origen específico del problema y actuar con distintos enfoques:

- Disminución de la rigidez de corte: la rigidez de corte está directamente relacionada con los coeficientes de corte del mate-

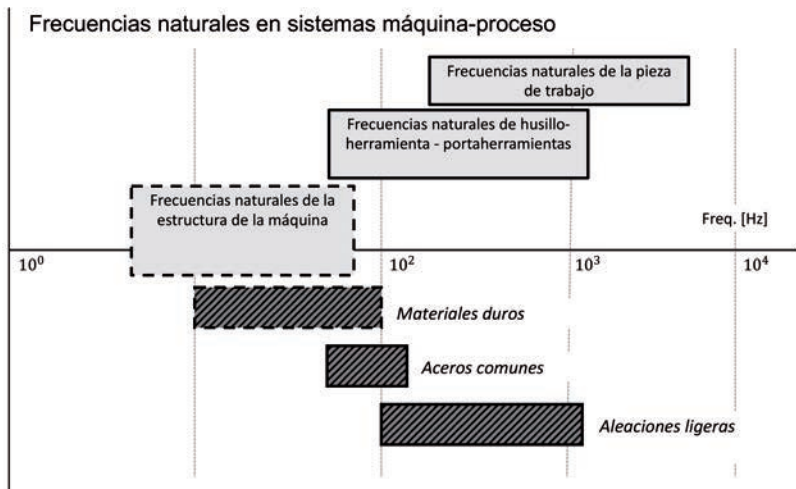


Figura 54: Frecuencias excitadas en máquina herramienta: frecuencias de máquina (bajas), medias (husillo-porta herramientas), elevadas (pieza-fijación) [Zulaika *et al.*, 2011].

- rial (K_c) y con la profundidad de corte. Reduciendo la profundidad se reduce el riesgo de chatter, pero se reduce la productividad del proceso. Recientemente se recurre a formas de corte innovadoras como *high-feed turning* en torneado o *plunge milling* en fresado, que permiten compensar la reducción de la profundidad con un aumento en el avance [Amigo et al., 2020 y 2023].
- Selección automática de velocidad de giro óptima: popularizado por algunos softwares disponibles en los 2000s (Harmonizer™ y Accordmill™), es una aproximación clásica al chatter y que utiliza una de sus características. Así, el punto de mayor productividad entre lóbulos se produce justo para la condición de resonancia, es decir, que la frecuencia de golpeo de los dientes de la herramienta coincida con la frecuencia natural del sistema. Para pasar de condición de chatter inestable a estable, un procedimiento iterativo (sintonización mediante prueba y error) busca una velocidad de corte en condiciones de resonancia hasta que desaparecen las vibraciones. Este método tiene varias desventajas, aunque el método funciona bien cuando hay un único modo de vibración claramente limitante. Además, o bien se requiere de una pasada de aprendizaje (*offline*), o bien se sintoniza in-situ (*online*) con lo cual pueden surgir marcas sobre la pieza antes de la corrección del problema. Además, el punto final puede ser de menor profundidad de corte que el inicial (si no se encuentra espaciado entre lóbulos a esa profundidad). En [Urbikain et al., 2014] se han puesto a punto utilidades para la monitorización y adquisición de variables de interés de forma online para su posterior procesamiento.
 - Selección de velocidad de giro óptima mediante diagramas de lóbulos: se trata de obtener unas gráficas llamadas *lóbulos de estabilidad* que definen la frontera entre el corte inestable (por encima) y el corte libre de vibraciones (por debajo), como se muestra en la figura 55. Tobias, Tlustý and Altintas fueron claves en este acercamiento. Estos gráficos representan en abscisas la velocidad de giro y en ordenadas la profundidad de corte. Los diagramas se calculan en función de los coeficientes de corte y de los parámetros dinámicos o modales. Para su estimación se resuelve la ecuación 10.1; existen varios acercamientos: métodos en el dominio de la frecuencia, numéricos, métodos en el tiempo, etc. Los diagramas de lóbulos son una buena herra-

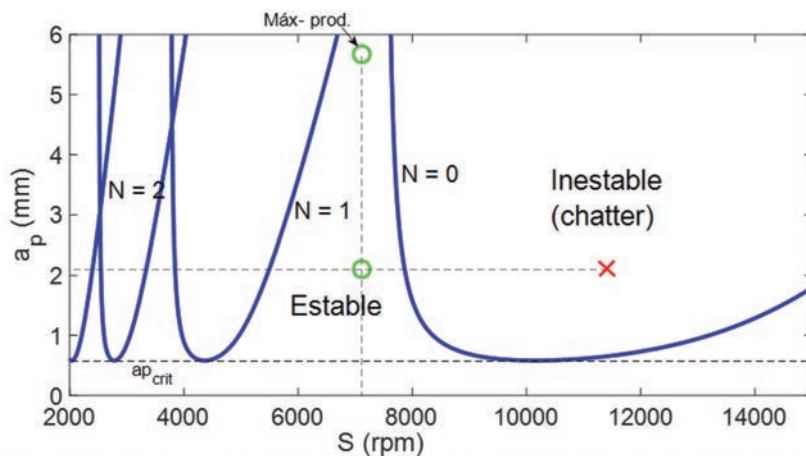


Figura 55: Diagramas de lóbulos, revoluciones del cabezal y profundidad de corte- Puntos estables e inestable.

mienta para resolver problemas de vibraciones, sobre todo en el desbaste, ya que los modos implicados son pocos y los lóbulos implicados suelen ser donde mejor se puede aprovechar las mayores profundidades de corte. La modelización del chatter se ha aplicado a torneado y fresado [Urbikain et al., 2012]. En el caso de las paredes delgadas los diagramas se plantean como tridimensionales, dado que durante el mecanizado la masa y rigidez de los componentes varían [Bravo, 2007], y así la tercera dimensión indicará el punto de la pieza donde se mecaniza.

- Fenómeno de *process damping*: (figura 56) a bajas velocidades y para ciertos materiales, el rozamiento de la cara desgastada de la herramienta con la pieza introduce un amortiguamiento adicional que podría permitir programar profundidades de corte mayores de las teóricamente libres de vibraciones. El problema

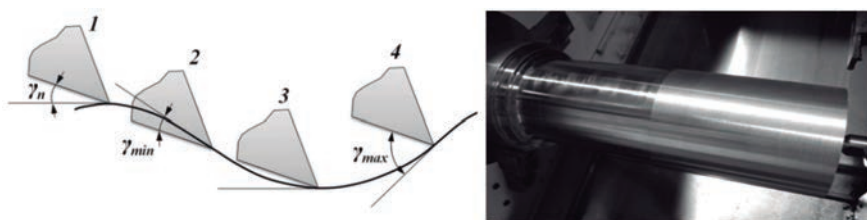


Figura 56: Izda. Talonamiento de la herramienta, responsable del "process damping". Dcha. Diferencia entre acabado superficial a altas (brillante) y bajas (mate) velocidades de corte.

- es que el “process damping” es un fenómeno difícil de modelizar puesto que evoluciona en el tiempo para cada condición particular de desgaste, material de corte, herramienta, condiciones de corte o parámetros modales. Así, su modelización precisa es muy compleja y debe realizarse caso por caso.
- Selección de la herramienta de corte: el chatter responde a un fenómeno periódico en el tiempo, y por tanto romper la periodicidad es una buena idea y conduce a proponer fresas de hélice y paso variable [De la Luz Sosa et al., 2020], o herramientas de filo tipo sinusoidal y trapezoidal, que han sido probadas en operaciones de desbaste o de medio-desbaste. Un nicho de aplicación es el mecanizado de álabes aumentando la productividad y la duración de la herramienta, al conseguir reducir los esfuerzos de corte [Urbikain et al., 2020].
 - Variación continua de la velocidad de corte (SSV): tiene el mismo objetivo que las herramientas anti-chatter del apartado anterior, es decir romper la periodicidad del corte, en este caso variando continuamente la velocidad de giro del cabezal. Hay distintas estrategias, pero la más exitosa es la variación sinusoidal de la velocidad de giro [Bediaga, 2009]. En este caso, hay que definir una velocidad nominal y la amplitud y período de ondulación. El mayor problema de esta técnica es la necesidad de un gran ancho de banda en el control del cabezal para ser capaz de acelerar/decelerar en las condiciones requeridas. Ha sido investigado por varios autores [Urbikain et al., 2016], [Muñoz et al., 2005], pero aún no es práctica industrial sistemática, aunque Soraluze® ya ofrece esta función.
 - Técnicas de amortiguación pasivas: la energía de la vibración puede absorberse utilizando absorbentes dinámicos sintonizables (DVA). Su problema es la colocación intrusiva en la máquina. Son casos de éxito los aplicados a rigidizar sistemas de mandrinado y grandes fresadoras. También se utilizan revestimientos superficiales mediante materiales viscoelásticos.
 - Técnicas de control y amortiguamiento activo: el problema de las técnicas de amortiguación pasivas es que una vez colocados los absorbentes, estos resultan insensibles a la alteración de las condiciones de corte o la posición de la máquina, que alteran la dinámica [Astarloa et al., 2023]. Los actuadores activos pueden ser la solución para elaborar estrategias de control y

mejorar la estabilidad del proceso [Yang et al., 2010]. Con el amortiguamiento activo se trata de introducir una fuerza en fase con la velocidad de vibración, pero en sentido contrario. La elección del tipo de actuador [Muñoa et al., 2016] va a condicionar el punto óptimo de colocación y el tipo de sensor que haya que introducir. En aplicaciones de fresado se utilizan los de estado sólido (piezoeléctricos) y los inerciales (electromagnéticos). Recientemente se han investigado los materiales magneto-reológicos [Puma-Araujo et al., 2020]. Como desventaja general, no existen criterios claros de dimensionamiento y puesta a punto.

- Cambios de diseño en la máquina tras el estudio del comportamiento dinámico: un buen modelo permite simular y obtener los diagramas de estabilidad de una máquina antes de ser construida, y detectar así aquellas direcciones más débiles donde se puede producir la autoexcitación de un modo de vibración principal. Este estudio es particularmente interesante en grandes fresadoras, donde es relativamente factible el cambiar masa y/o rigidez de algunos elementos, e incorporar los amortiguadores pasivos o activos arriba indicados. En la figura 57 se muestra el resultado para una fresadora de la empresa N.Correa [Zulaika et al., 2011]. La limitación de este acercamiento es la imposibilidad de definir el amortiguamiento sin realización de ensayos experimentales.

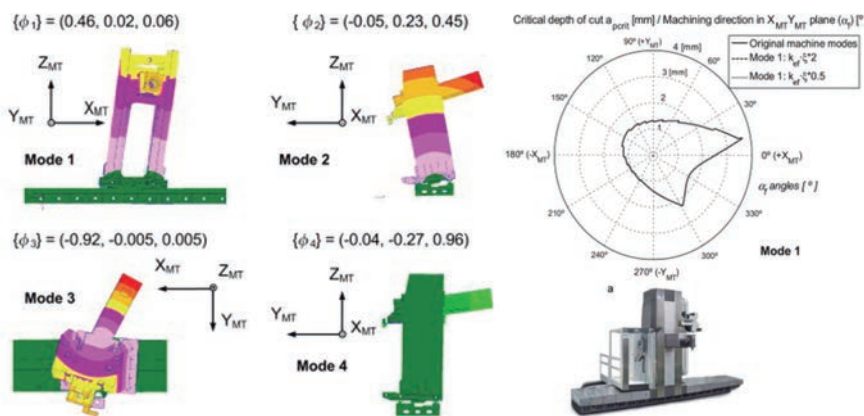


Figura 57: Los 4 nodos principales de una gran fresadora: frecuencias 15,1- 17,5- 26,8 y 34,2 Hz. Dcha. Profundidad de corte limitante en las direcciones del plano XY.

El chatter es un viejo enemigo del mecanizado y por tanto del trabajador del metal, y está lejos de ser derrotado. Los nuevos materiales disponibles para fabricar piezas permiten nuevos diseños más rupturistas, que constituyen auténticos quebraderos de cabeza para el operario durante su mecanizado. Por citar un ejemplo, en componentes de turbina se utilizan nuevas aleaciones níquel-cobalto muy difíciles de mecanizar y que implican elevadas fuerzas de corte. Además, los componentes son de paredes delgadas y muy flexibles, y como resultado el chatter acecha en muchas operaciones, o en zonas de la pieza de acceso complejo.

Por otra parte, la fabricación aditiva implica piezas con estructuras metalúrgicas anisotrópicas, incluyendo geometrías esbeltas e intrincadas, paredes muy finas, etc. llevando los problemas dinámicos del mecanizado a un plano superior desconocido. Es por ello que, en los últimos años, se vienen desarrollando trabajos para entender mejor el comportamiento de estos materiales y su mecanizado y vibraciones [Perez-Ruiz et al., 2021 y 2023].

En todo caso tenemos muy buenos ingenieros y doctores expertos en dinámica de máquinas, en los centros Ideko-BRTA (Dr. J. Muñoa, Dr. X. Beudaert, Dr. I. Bediaga, Dr. Astarloa y otros) o Tecnalía-BRTA (Dr. J.J. Zulaika), en la UPV/EHU (Dr. Urbikain) trabajando para nuestras empresas. Es una batalla ardua, pero se conoce el terreno, se dispone de medios y hay moral de victoria. ¿No son esas las claves del Arte de la guerra?

11. LA NUEVA REVOLUCIÓN 4.0

El término Industria 4.0 fue utilizado en 2011 por el gobierno de Alemania para definir una línea de apoyo a la industria y se comenzó a extender durante la feria de Hannover de ese año. El estado de desarrollo de las comunicaciones industriales, los sistemas de control escalables y conectables a las redes, los desarrollos de internet y el reverdecimiento de ideas propias del campo de la inteligencia artificial, hicieron pensar que la industria estaba alumbrando un salto tecnológico del nivel de una revolución industrial. Por otra parte, el marketing en el sector industrial necesitaba etiquetas novedosas; así nació el concepto de 4.0 y se ha extendido hasta englobar los actuales avances en producción. Nadie lo discute ya, se entiende que

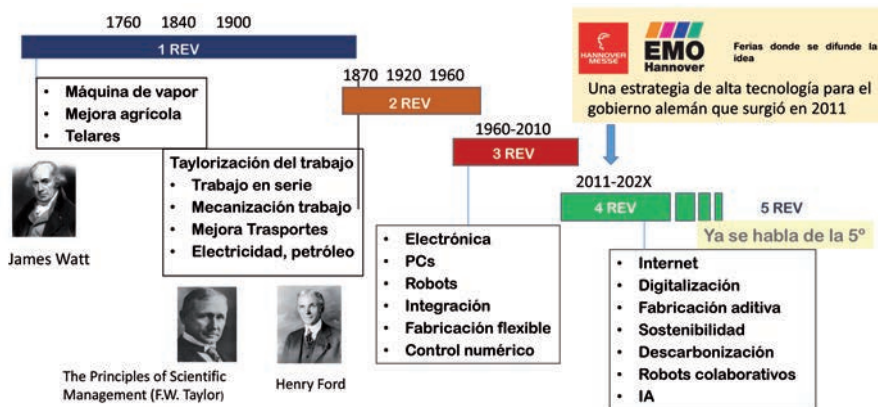


Figura 58: Contexto y evolución histórica de las revoluciones industriales.

nos encontramos de lleno en esta revolución industrial. La figura 58 define los años aproximados de cada revolución, y algunas personas clave que los historiadores indican como muy relevantes en cada periodo, aunque cada rama de la ingeniería seguramente propondría otros nombres también. Como se puede observar, cada nueva revolución es más corta que la anterior; desde el desarrollo de una invención hasta su extensión en la sociedad se ha ido reduciendo el tiempo; actualmente la rapidez nos deja casi atónitos. Hay avances constantes, más investigadores y desarrolladores mejor conectados entre sí, e imbuidos por una cultura que prima la innovación y la búsqueda de respuestas. Estos factores hacen que la evolución acelere exponencialmente.

El alcance de 4.0 es amplio, se integran ideas de digitalización en varios niveles, nuevos procesos como la fabricación aditiva, nuevos modelos cercanos a la realidad que emplean conceptos físicos, modelos de datos que intentan reproducir el comportamiento de un proceso o sistema y que se denominan *gemelo digital*, avances en robótica colaborativa y móvil, incluso nuevos materiales.

Todos estos avances tienen repercusión en el campo de la fabricación mecánica, por lo que desarrollaré las líneas generales del estado del arte de algunos de ellos. No entraré en demasiada profundidad, dado que cada campo es muy extenso y honestamente mi conocimiento es limitado.

11.1 La digitalización de plantas y procesos

La integración de sistemas de producción en plantas interconectadas presenta tres retos de desarrollo:

- Conectividad: las máquinas con sus sistemas de control numérico, autómatas programables (PLCs), controladores de robot, y sistemas de captación de datos de tipo *edge computing* deben comunicarse con diferentes protocolos y frecuencia de captación de datos.
- Captación y registro de datos de sensores y parámetros de máquinas y procesos, y se almacenan en bases de datos más o menos ordenados. Suelen denominarse *data lakes*.
- Modelos de datos, que relacionan los datos de entrada con las variables de salida. Las decisiones pueden ser automáticas o bien por parte de los técnicos, pero inspiradas por estos modelos.

La conectividad es muy compleja, es un mundo lleno de siglas e incluso con pugnas comerciales muy activas en el mercado. En general existen niveles de integración de bajo nivel, que automatizan entornos cercanos a la máquina herramienta, por ejemplo los sistemas de carga y descarga de piezas y herramientas. Existe otro nivel de información más estructurada, que recoge información desde sistemas de control ubicados en la máquina, por ejemplo variadores de velocidad desde donde obtener valores de potencia, o datos sobre el programa y proceso ejecutado que suministra el CNC, o sensores colocados exprofeso para captar algunas señales. Esta información puede ser recogida en un sistema denominado *edge computing*, o computación en el borde, que se encarga de filtrar y estructurar la información y enviarla al servidor de datos. En máquina herramienta los sistemas de *edge computing* son pequeños controladores que se insertan en los armarios de control de las máquinas. Por otro lado, no olvidemos que el propio CNC de la máquina es un potente ordenador, con capacidad de servir información mediante comunicación *ethernet* o vía *WIFI*.

Muchos de los esfuerzos actuales tratan de definir estas estructuras de comunicaciones, establecer pasarelas entre sistemas, e incluso estandarizar en lo posible los protocolos de petición y servicios de datos, como es el caso de OPC/UA (*OPC Unified Architecture*). Existen soluciones desde software propietario, pero también en el

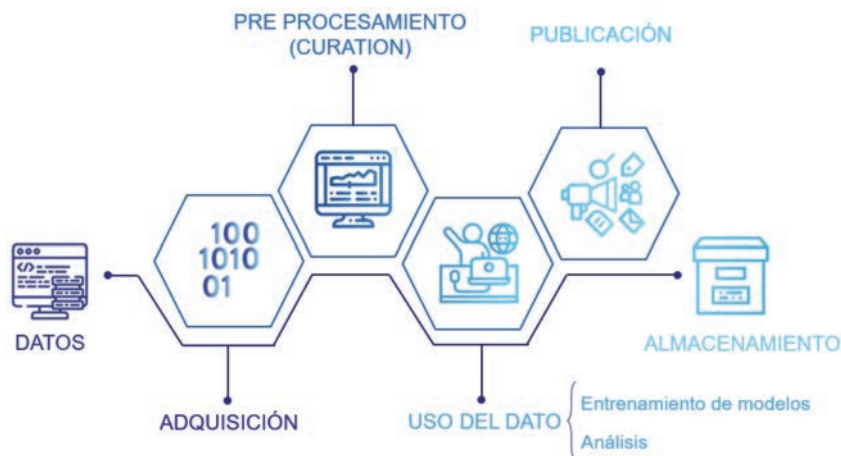


Figura 59: Las fases de captación de datos en el taller hiperconectado.

campo del software libre; me ha parecido que mostrarles en la figura 59 y 60 los sistemas desarrollados en el Centro que dirijo puede ser ilustrativo del reto y de la solución.

Una vez los datos son servidos, curados y ordenados, su destino es almacenarse en los denominados *data lakes*. La efervescencia en los últimos años en almacenar información sugiere incluso un cierto síndrome de Diógenes digital. Tras la fase de almacenamiento, se buscará que los datos sirvan para un fin útil. Como se ha dicho alguna vez, los lagos de datos debieran ser ríos de conocimiento sobre cómo está la salud de, a) tu máquina, b) tu proceso, c) cuál es la calidad esperable de tu pieza. Los ingenieros que conocen cada uno de estos tres tópicos deben indicar a los expertos en datos qué es valioso almacenar y qué superfluo: como sucede siempre, el experto en el proceso es el que sabe qué vale y qué no.

Así surge la fase clave de analizar los datos y establecer los modelos que relacionan lo que ha pasado con lo esperable a futuro, es decir utilizar el dato en informes o en propuestas para los sistemas de decisión. En esta fase conceptos como el *machine learning*, con los múltiples algoritmos de decisión hoy día disponibles, o las redes neuronales, u otras herramientas que se engloban en el amplio concepto de inteligencia artificial son de gran novedad. En el campo concreto del mecanizado, permítanme dar tres ejemplos.

El primero de ellos, si se captan datos de consumo de los motores de avance o del husillo principal de la máquina, y se tiene un mo-

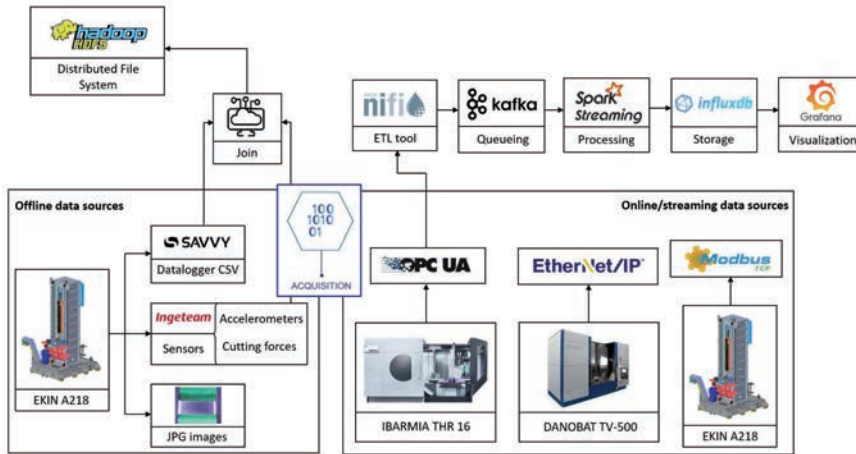


Figura 60: Un ejemplo de conectividad: la del Centro de fabricación avanzada aeronáutica CFAA. Módulos utilizados en la captación y curado de los datos.

delo de fuerzas de corte empírico que relaciona el par en los motores de los ejes de la máquina con el desgaste de la herramienta, el modelo podría predecir y dar aviso antes que una fresa o plaquita del torno presentase un desgaste excesivo de flanco, y por tanto cortase mal produciendo una mala calidad a la pieza. Se tendría un *gemelo digital* del comportamiento de la máquina y proceso.

Un segundo ejemplo, si cada cierto tiempo se ejecutan secuencias fijas de operación para determinar el estado de las características de la máquina, y los datos así obtenidos se comparan con el patrón de normalidad, el denominado *fingerprint*, este modelo permitiría un mantenimiento y recalibración más eficiente. Incluso la máquina podría corregir por software los errores progresivos de diversa índole que se fuesen detectando.

Finalmente, otra idea recurrente en varias convocatorias europeas es plantear modelos que monitorizando variables de máquina y proceso predigan directamente si un componente producido se encuentra dentro de los requisitos de calidad adecuados, tanto metrológicos como de rugosidad e integridad superficial.

A fecha 2024, la conectividad y el planteamiento de modelos es el esfuerzo de muchos compañeros de profesión, y debe entenderse que es un problema enormemente multidisciplinar. En mi opinión la multidisciplinaridad es el reto mayúsculo a resolver, que podríamos resumir así de una forma didáctica: al noble linaje de la ingeniería

con el newton (como unidad) se le sumó hace unas decenas de años la del voltio, teniendo al vatio como vínculo. Tras ello se sumó a nuestra profesión la familia del milivoltio, y más tarde la del microvoltio. No tardó en llegar la del bit y del byte en la tercera revolución industrial. Y en poco aparecieron los Gigabytes, incluso terabytes, y para culminar las gentes de telecomunicaciones con sus siglas y estándares, y el 5G, incluso asomando ya los primeros rayos del 6G. Los retos actuales requieren conocimientos muy diversos, ¿cómo gestionar este grupo de técnicos?, ¿cómo gestionar un campo tan extenso y multidisciplinar? Éste es el reto de los encargados de liderar el cambio digital, el saber qué hay que hacer, y disponer luego de los medios para hacerlo.

También se ha acuñado en el último año el término de *ingeniería prompt*, que sería aquella que utilizando estos modelos de forma interactiva puede extraer lo mejor de una máquina, proceso y modelos. La forma de interactuar de los nuevos chats de inteligencia artificial ha generado esta forma de interactuar con las nuevas aplicaciones.

En resumen, la digitalización es un no parar y queda mucho por hacer.

11.2 Fabricación aditiva

El ser humano ha aprendido a modelar y moldear materiales metálicos desde tiempos inmemoriales. Así la fundición en molde ha seguido perfeccionándose hasta nuestros días, y existe una variante de precisión utilizando modelos de cera perdida y cáscara cerámica que ya era utilizado para la realización de esculturas de bronce en la Grecia clásica.

El campo de los materiales metálicos es donde más tecnología y tiempo de maduración se ha necesitado. Para su obtención y conformado se necesitan altas temperaturas, y en el enfriamiento o solidificación surgen problemas de contracción y deformación térmica que impiden precisión y añaden el riesgo de imperfecciones internas. Por este motivo el proceso de fundición siempre implica incertidumbre en la forma y dimensiones e incorpora riesgos de aparición de defectos. Quizás por ello antes y desde la primera revolución industrial la tecnología se decantó por procesos de forja o laminación y la posterior eliminación de material por arranque de viruta. La pa-

radoja de esta elección era y es que donde previamente se había generado material, en el mecanizado se eliminaba, con la pérdida de energía, material y recursos que ello conlleva.

En los 1970s tibiamente, y a partir de los noventa con mayor vigor comenzó la era del “prototipado rápido”, que en la actualidad se engloba en la “fabricación aditiva”. La fabricación aditiva busca formas de fabricar colocando o añadiendo material allí donde el ingeniero estima necesario. De esta forma, muchas de las restricciones impuestas por el proceso primario de fabricación desaparecen, bien sea fundición o forja. La aportación directa de material introduce la posibilidad de optimizar diseños e incrementar la funcionalidad de los componentes.

Hoy día es una realidad lo que solo hace 40 parecía un sueño, en concreto que punto a punto, línea a línea, o capa a capa se puede materializar casi cualquier geometría en materiales metálicos e incluso cerámicos. En el campo aditivo se suele decir que la complejidad del diseño es gratis, dada la posibilidad de fabricar cavidades internas y geometrías muy complejas. Además, se facilita el poder fabricar piezas unitarias, lo que abre el camino a la personalización de los diseños. Uno de los campos de aplicación más prometedor es la fabricación de prótesis e implantes, personalizando los componentes a cada paciente.

La fabricación aditiva se define como un proceso de unión de materiales para crear objetos a partir de datos de modelos 3D (figura 61), generalmente capa tras capa. Hoy día son términos sinónimos: procesos aditivos, técnicas aditivas, fabricación aditiva por capas, y

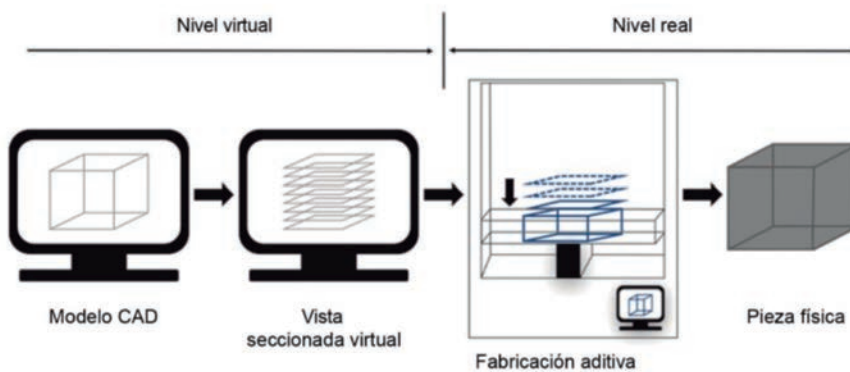


Figura 61: Fabricación aditiva: del diseño 3D al componente.

fabricación de forma libre, esta última definida por Beaman et al. [1997] como *Solid Freeform Fabrication* (SFF). Actualmente las diferentes ramas de fabricación aditiva se recogen en normas del recientemente creado comité ISO/TC 261, y su clasificación se recoge en ISO/ASTM 52900:2021 (*Additive manufacturing - General principles. Fundamentals and vocabulary*). La norma cambia constantemente dada la efervescencia de la tecnología y las nuevas variantes que se comercializan. Actualmente las principales técnicas de fabricación aditiva son:

- *Binder jetting (BJ) - Inyección de aglutinante*. Este proceso consiste en depositar selectivamente aglutinante sobre un lecho de polvo. De esta forma se unen las partículas sin fuente de energía externa, mediante aglutinante y por la acción de una lámpara de secado. Como consecuencia las piezas resultantes (se denominan *verdes*) son blandas y no están sujetas a tensiones residuales que puedan causar deformaciones. Sin embargo, sin fusión ni compresión, las piezas son muy porosas. Por este motivo puede aplicarse un tratamiento en horno de sinterizado, que aumenta las propiedades mecánicas pero puede inducir deformaciones.

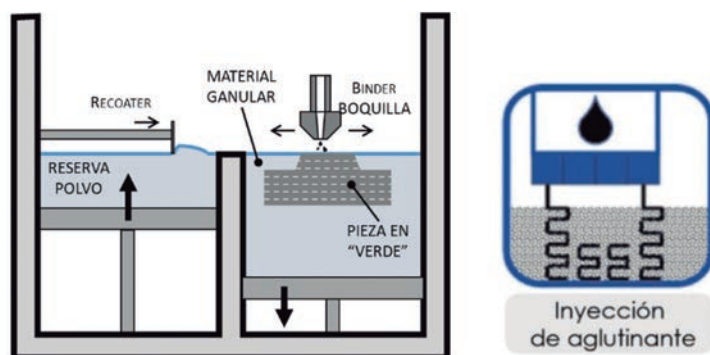


Figura 62: *Binder jetting (BJ)* [Lamikiz et al., 2023].

- *Directed energy deposition (DED) - Deposición por energía dirigida*. Esta categoría se refiere a los procesos en la que el material se funde mientras está siendo depositado, enfocando con una fuente de energía en la zona de deposición. El material de partida puede aportarse como hilo o polvo, y se emplea una máquina o un robot que controla el movimiento de deposición. Se

trata de técnicas que no tienen un volumen límite y que pueden integrarse en grandes máquinas. La fuente de calor es el láser o un equipo de soldadura.

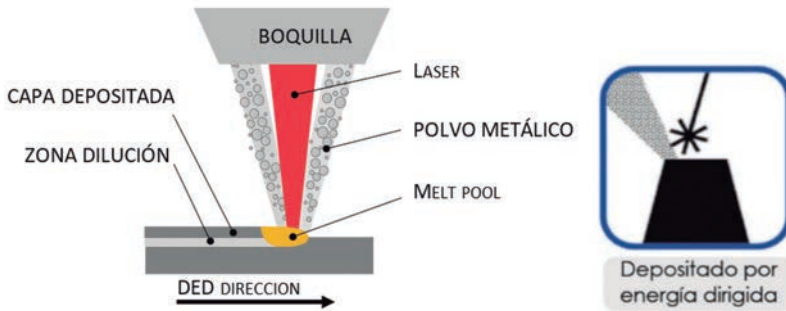


Figura 63: Directed energy deposition (DED).

– *Material extrusion (ME) - Extrusión.* En este proceso el material fundido se deposita sobre la capa anterior, por acción de una boquilla. La extrusión de polímeros (plásticos) se considera la tecnología aditiva más accesible al público no industrial, siendo muy popular la conocida impresora 3D.

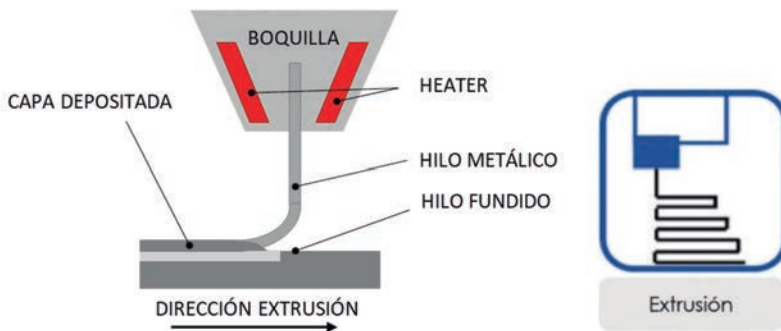


Figura 64: Material extrusion (ME), representado para metales.

– *Material jetting (MJ) - Inyección de material.* En esta categoría las piezas se fabrican depositando sucesivamente gotas de fotopolímero que se convierten instantáneamente en sólidas al someterlas a un sistema de curado con lámparas ultravioletas.

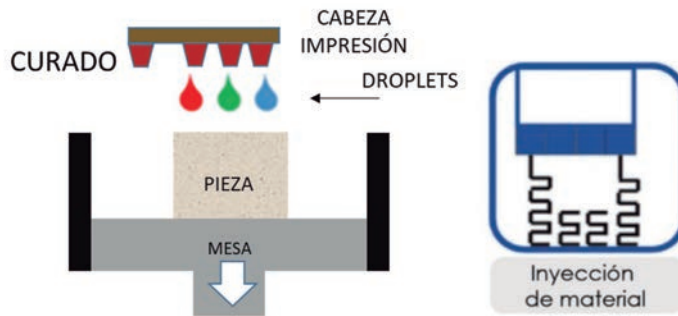


Figura 65: Material jetting (MJ).

– *Powder bed fusion (PBF) - Fusión en lecho de polvo.* Este proceso consiste en fundir selectivamente zonas en capas de polvo aplicadas por un rodillo en el interior de una cámara de fabricación. La cantidad de energía necesaria para fundir el polvo se suministra con un láser (LPBF) o con un haz de electrones (EPFB) que barren la superficie. Es de aplicación a polímeros, pero en la industria lo que interesa sobremanera es su aplicación a polvo metálico, dado que es la llave de fabricar componentes realmente funcionales. Actualmente es el proceso más utilizado en aeronáutica y espacio, y ya existen componentes certificados y volando fabricados con esta tecnología.

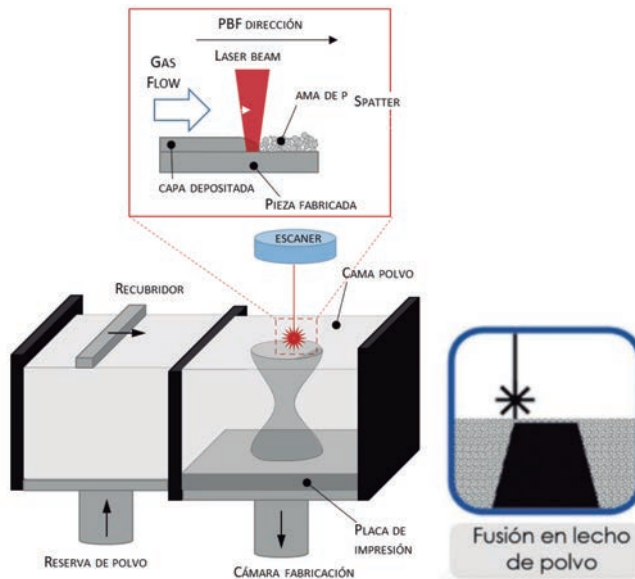


Figura 66: Powder bed fusion (PBF).

- *Sheet lamination (SL) - Laminación de chapas*. Este proceso consiste en apilar chapas, contornear cada una a una forma creciente y adherirlas una a una hasta formar la geometría en 3D. Posteriormente hay que acabar las superficies por fresado.
- *Vat photo-polymerisation (VPP) - Fotopolimerización*. Se trata del heredero de la primera técnica de fabricación aditiva denominada estereolitografía, la cual fue desarrollada en los 1980s por la empresa estadounidense *3D Systems*. La pieza se fabrica sobre una cuba de fotorolímtero líquido. Cada capa se crea transformando el fotorolímtero líquido en sólido, por medio del escaneado de una luz láser ultravioleta.

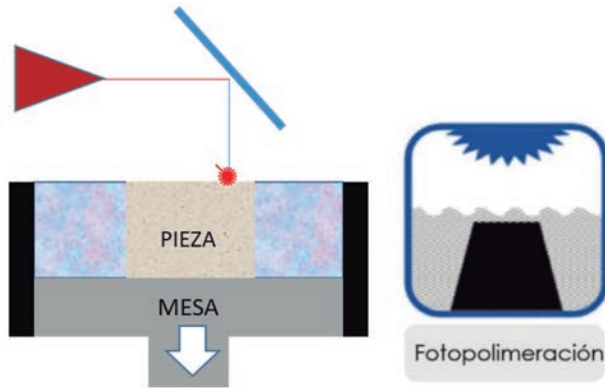


Figura 67: Vat photo-polymerisation (VPP).

Algunas de estas tecnologías son de aplicación en polímeros y en materiales metálicos. Sin embargo, en el segundo caso los retos son mucho más complejos, dado que los metales funden a temperaturas muy superiores y generalmente hay que proteger el proceso de la oxidación y otros efectos negativos.

En 2024, estas tecnologías pueden llegar a fabricar formas finales muy precisas, que algunos denominan *ultra-near-net-shape*. Sin embargo, en la mayoría de los casos se deben realizar dos operaciones posteriores al proceso aditivo:

1. Tratamiento térmico para mejorar propiedades mecánicas, tales como el *Hot Isostatic Pressing*, un tratamiento que somete los componentes a 1.000 bares de presión y 1.000 °C. Permite cerrar y eliminar defectos tales como pequeños poros y grietas de origen termomecánico. Otros tratamientos térmicos son también habituales.

2. Mecanizado, rectificado, pulido o electroerosión. Pese a la perfección alcanzada, la precisión de la tecnología aditiva no es suficiente en muchos detalles funcionales, siendo necesario el mecanizado posterior [Calleja, 2015]. El mecanizado sigue siendo la técnica que ofrece productividad y precisión suficiente.

En nuestro grupo universitario nos hemos centrado en el reto de fabricar en metal, ver figura 68. En concreto, estamos más enfocados en las ramas LPBF (con láser) y DED con polvo y con hilo metálico, siendo estas dos las técnicas más empleadas en el sector aeroespacial. La figura recoge sus principales características. Las aleaciones de base níquel o cobalto presentan buenas características ante el proceso de impresión/solidificación [Tabernero et al., 2011]. En reglas generales se podría decir que el LPBF busca fabricar piezas completas, mientras el DED [González, 2022] se centra más en reparación o en adiciones a piezas y formas preexistentes.

Demostremos algunos ejemplos que demuestren las posibilidades de la tecnología aditiva.

Así, uno de los principales nichos de esta tecnología es la fabricación de intercambiadores de calor basados en geometrías TPMS (*Triply Periodic Minimal Surface*), ver figura 69. Son geometrías con máxima superficie de contacto en un mínimo volumen espacial. En estas piezas se añaden las ecuaciones triple periódicas que les otorgan la geometría de intercambio, y los problemas en la fabricación del proceso LPBF. Deben conseguirse paredes muy delgadas sin poros

	(LPBF o SLM)	(DED)		
		LMD Láser polvo	WMD Láser hilo	WAAM Arco e hilo
Precision/Rugosidad	Alta Aprox $\pm 20\mu\text{m}$ / $>5\mu\text{mRa}$	Media Aprox $\pm 0,2\text{mm}$ / $>10\mu\text{mRa}$		
Integridad estructural	Alta Cámara de vacío/inerte gas	Alta Gas inerte		
Tamaño de pieza	Pequeña Tamaño de la cámara y placa	Variable Piezas de gran tamaño		
Aplicación industrial	Fabricación directa de piezas	Reparación o fabricación de formas primarias • Recubrimiento (cladding) • Detalles complejos en piezas existentes		










Figura 68: Tecnologías de interés en CFAA. LPBF y DED.

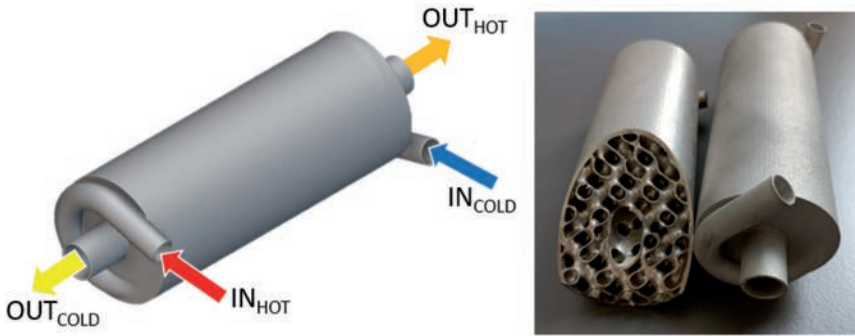


Figura 69: Intercambiadores TPMS (CFAA, 2023).

para un máximo intercambio de calor, y para ello deben estudiarse las tensiones y deformaciones, y rugosidad en las superficies. Además, algunas de ellas deben incluir soportes que dejan mala rugosidad al ser eliminados, canales internos que no se pueden postprocesar, etc. Problemas que se pueden resolver tras ser investigados.

Demos un segundo ejemplo. En fabricación aditiva se abre la posibilidad de poder personalizar no solo el diseño del componente sino la estructura cristalográfica de la aleación (es decir, extender el concepto *Taylor-Made* hasta la estructura metalúrgica). Controlando la potencia del láser, el patrón y la velocidad de barrido en cada capa, pueden surgir microestructuras en el material con propiedades mejoradas [Perez et al., 2021]. Los componentes fabricados mediante LPBF son anisótropos, y esto puede utilizarse como una valiosa herramienta para el diseño si se conoce cómo cuantificar y controlar la anisotropía.

En relación a este punto, un campo interesante es el mecanizado de piezas obtenidas por LPBF, dado que no se ha estudiado en profundidad. Los modelos mecánicos (Eq. 4.2) para la determinación de coeficientes lineales o exponenciales permiten simular aceptablemente las fuerzas de corte; sin embargo, no permiten obtener coeficientes con significado físico. Este aspecto hace que la obtención de los coeficientes mecánicos para materiales LPBF por métodos de regresión lineal obligue a realizar ensayos en todas las orientaciones posibles de la herramienta debido a la dependencia direccional de la fuerza de corte. En un trabajo reciente cuyo resumen se muestra en la figura 70 [Perez et al., 2021] se mostraron las interacciones entre la microestructura de Inconel 718 obtenido por LPBF,

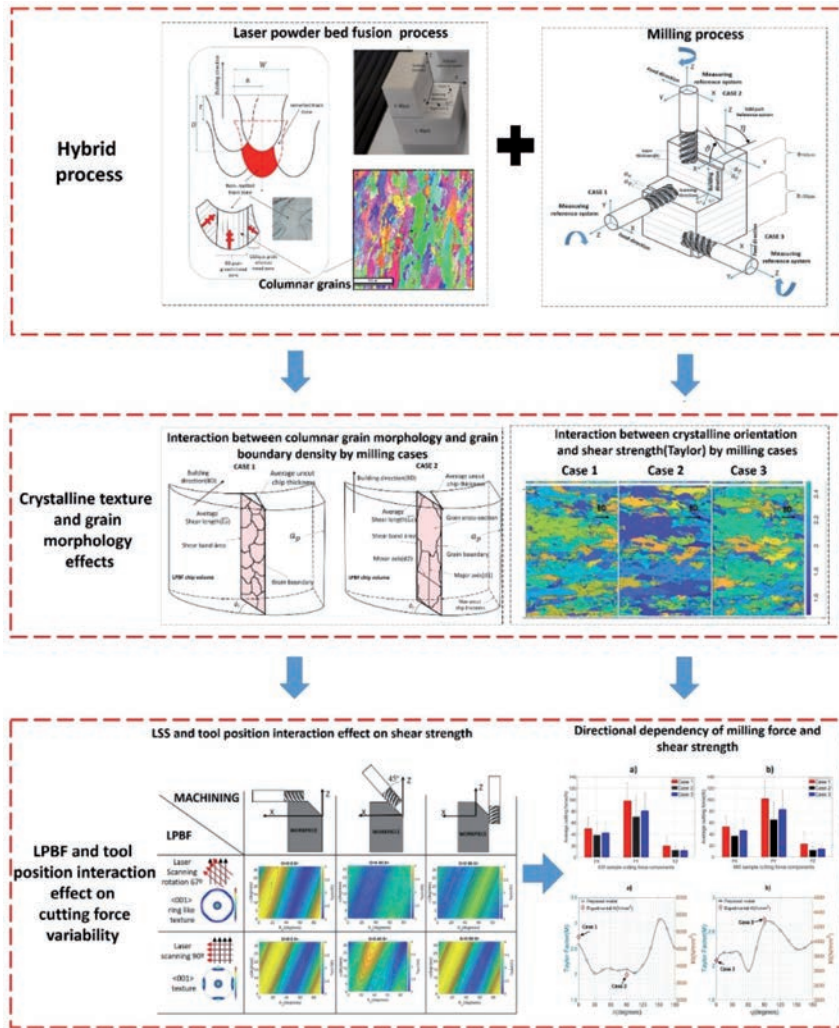


Figura 70: Relación entre la impresión, textura y comportamiento mecánico: aplicación al mecanizado [Pérez *et al.*, 2021].

la posición de la herramienta y las fuerzas de corte, y se presentó un modelo de microplasticidad por cizalladura oblicua para obtener el factor de Taylor. Se ha establecido una relación cuantitativa entre los coeficientes obtenidos experimentalmente y el factor de Taylor para cualquier posición de la herramienta, que permite predecir los coeficientes de corte para otras orientaciones de la herramienta respecto a la pieza. Se evita así múltiples ensayos experimentales para cualquier otra dirección.

Más allá de este ejemplo, en el campo de fabricación aditiva existe una necesidad de que el ingeniero de materiales y el de fabricación colaboren estrechamente, o bien sean las mismas personas. La posibilidad de controlar la microestructura del material hace que material y proceso aditivo pasen a ser parte del ciclo de diseño global.

Respecto a la integración y absorción industrial de las tecnologías aditivas, debemos referirnos a la productividad y al tamaño de las piezas. Hoy día ya existen sistemas de fabricación aditiva de *Laser Powder Bed Fusion* dotadas de 4 o más láseres que actúan simultáneamente. Y por otra parte el volumen de las cámaras de impresión sigue creciendo en las máquinas presentadas en cada feria, siendo la FormNext de Frankfurt la feria anual más importante en este campo. Y no se habla de piezas únicas, sino de lotes de tamaño de cientos incluso miles de piezas al año.

En el CFAA la tecnología de fabricación aditiva es clave, dado que los ingenieros más optimistas estiman que el 30% de los componentes de un motor de avión se fabricará por vía aditiva antes de 10 años, y así serán certificados. Las razones son: las aleaciones de níquel-cobalto funden bastante bien, así como las de titanio, la reducción de peso en los diseños puede ser drástica si comparamos con la forja o fundición a cera perdida, y finalmente los lotes no son grandes, de centenares a lo sumo. Si se sigue trabajando en modelización, repetitividad, y haciendo los procesos más estables, la certificación de este tipo de componentes se simplificará, y más componentes se sumarán a los pocos hoy ya certificados.

Muchos de los presentes se preguntarán si la fabricación aditiva permite obtener buenas propiedades mecánicas o físicas. La respuesta es sí, podría llegarse a un 90% de características resistentes. Sin embargo, hay muchos estudios por realizar, proponer cambios de códigos de diseño, etc. que ya son objeto de la curiosidad de algunos compañeros de esta Academia, y de ingenieros en muchas universidades [Ostoloza et al., 2023], centros tecnológicos y empresas [Coro et al., 2019)].

La fabricación aditiva ha venido para quedarse en nuestras empresas, y en el campo de los polímeros incluso en nuestras casas. Las fronteras tecnológicas se van venciendo poco a poco, y la tecnología se abarata con la mayor compra de equipos y mayor competencia entre empresas.

¿Pero esto significa que se va a acabar la necesidad de utilizar la

fundición o la forja? Todo apunta a que no, es cuestión del número de piezas del lote, que si es alto recomienda la fundición de precisión. ¿Se va a eliminar el mecanizado?, por ahora y en mucho tiempo no, alcanzar precisiones de micrómetros está todavía vedado a lo aditivo. ¿Puede disminuir el coste de las impresoras tanto como ha ocurrido con las impresoras de polímeros? Probablemente no, el metal funde a muchos grados Celsius y las impresoras (no debiéramos llamarlas así, sino equipos de fabricación aditiva) seguirán siendo costosas, los láseres delicados, e incluso el polvo metálico es peligroso ante deflagración o auto combustión. En metal la fabricación aditiva implica equipamiento industrial.

No hay duda de que cada día se definen nuevos campos de aplicación, y que la tecnología aditiva va a seguir una evolución imparable abarcando nuevas aplicaciones. Hay estudios que recalcan el crecimiento del volumen de negocio de la fabricación aditiva en los últimos años, siendo de unos 12.000 millones de dólares durante 2019. Sin embargo, es importante destacar que durante ese año el volumen de negocio total del “manufacturing” fue de unos 14.000.000 millones de dólares, por lo que la fabricación aditiva representó menos de un 0,1% a pesar del continuo crecimiento de estas técnicas.

Se trata por tanto de un grupo de tecnologías aplicadas a un campo de aplicaciones muy específico; todo apunta a que continuarán siendo tecnologías con un nicho de mercado muy definido, eso sí, siempre en crecimiento.

11.3 Coworkers y CoBots

En esta misma sala se han explicado magistralmente las últimas tendencias de la robótica en varios discursos de ingreso. No voy a descubrir mucho más, pero sí quizás indicar la rapidísima extensión en entornos industriales de dos conceptos claves en los últimos cuatro o cinco años.

Por un lado, los robots cooperativos o creados para interactuar físicamente con humanos en un entorno colaborativo de trabajo. La razón de su mayor uso no es otra que la bajada de precio y la mejora de funcionalidad ofrecida. Entre ellos se encuentran los brazos de cinco o seis grados de libertad, dotados de sensores de intensidad o de fuerza en algunas o todas sus articulaciones. Los sensores permiten que los operarios no peligren ante una colisión, dado que el robot para. Su programación se ha hecho más fácil, tanto en la clásica



Figura 71: Solución de AMV y robot colaborativo en el CFAA, para carga y descarga de herramienta en máquinas fresadoras y tornos verticales.

forma de *teaching*, como en entornos virtuales tipo CAD/CAM o con sistemas de mímica. Muchos de estos robots pueden repetir secuencias programadas aprendidas del operario. Este desarrollo contrasta con el de robots industriales, a veces llamados “duros”, diseñados para operar autónomamente y sin operarios en el entorno, tal y como funcionan la mayor parte de los robots industriales construidos hasta la década de 2010 y todavía hoy lo hacen.

La figura 71 muestra la solución desarrollada en 2022 por un grupo de empresas nacionales, para la carga y descarga automática de herramientas en el taller del CFAA, pero pensando en ser un demostrador escalable a una importante empresa. Otras soluciones cercanas a mi experiencia [Rodríguez et al., 2023] han sido las orientadas al control metrológico, pulido y redondeamiento en componentes tipo carcasas o álabes. Los aquí presentes pueden pensar en cómo actúan al lijar o pulir ustedes mismos, éste es un proceso complejo donde la monitorización que el ser humano hace de la fuerza aplicada, el control de las trayectorias, y la visión del estado intermedio y final de las superficies implican numerosos lazos de control. Estos objetivos pueden conseguirse con un robot colaborativo dotado de algunos sensores adicionales, con la ventaja de que el robot no se cansa y es muy repetitivo.

El otro concepto clave son los *Robots Móviles Autónomos (AMR)*, normalmente con sistemas de navegación basada en láseres u otro tipo de geolocalización en entornos cerrados. Estos nuevos vehícu-

los han completado la oferta de los ya conocidos AGVs (*Automated Guided Vehicles*) que siguen líneas marcadas en el suelo. Como se observa en la figura 71, montar un robot colaborativo en un AMR es ya un hecho probado, habitual y útil.

El futuro incorporará también algunos robots de tipo antropomórfico o humanoides, pero en 2024 los robots humanoides demasiado complejos o costosos. En los talleres se mezclan robots industriales y cooperativos.

Me atrevería a decir que la palabra robot, que viene del lenguaje checo y significa siervo, podría ser considerada semánticamente antigua ante la posible nueva denominación de *coworker* o *cobot*. Y me atrevería a decir que la robótica ahora no busca eliminar coste de mano de obra, sino soluciones con enorme repetitividad y que permiten una gran mejora en la calidad final.

11.4 Otros

En este discurso he tratado de centrarme en los puntos clave del sector de máquina herramienta y en concreto del mecanizado. También he tratado de introducir ideas de campos importantes como la automatización o fabricación aditiva. Podría haber abarcado otras tecnologías claves en este campo, entre ellas:

- Procesos no convencionales, entre ellos el método de electroerosión. Tenemos la suerte de tener una empresa líder en este campo, ONA electroerosión. También podríamos haber hablado del corte por agua, corte por láser u otras tecnologías.
- Realidad virtual y aumentada. El uso de sistemas de ayuda al operario puede ser clave a medio plazo, y en general todo el campo de interfaces de usuario.
- Telediagnóstico de las máquinas, utilizando las capacidades de la conexión a las redes de datos para realizar acciones de mantenimiento. Se trabaja intensamente en formas de recalibrar las máquinas de forma periódica, utilizando secuencias de chequeo y mediante modelos basados en machine learning.
- Nuevos modelos de negocio que podrían plantearse, como el alquiler de máquinas o el pago por pieza realizada.

No se pueden abarcar todos estos campos con cierta profundidad, pero al menos citarlos me ha parecido obligado. Sí me gustaría

transmitir una idea que tomo prestada del actual presidente (el que hace el número 142 y sucesor en el cargo de F.W.Taylor) de la ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) Prof. Thomas Kurfess, y que expresó en la conferencia celebrada por la academia de México y nuestra Academia en 2023: “cómo es posible que tu abuela para consultar el tiempo en su móvil, use datos de 17 satélites, 5 modelos de datos, 3 supercomputadores y dos torres de comunicaciones, mientras todavía hoy existen máquinas herramienta cuyo CNC utiliza Windows 95”. Como se puede deducir de esta sentencia, queda mucho por hacer. Con la tecnología actual podrían ofrecerse muchos nuevos desarrollos.

También se empieza a hacer referencia a la Sociedad 5.0 que podría estar relacionada con una quinta revolución industrial, que se caracterizaría por la colaboración entre las máquinas y los humanos. Su objetivo sería llevar las posibilidades de la tecnología al ciudadano, con objeto de reducir las tradicionales cargas que afronta el ser humano, una de ellas el trabajo duro. El tema no es nuevo, ya en junio de 1930, el economista británico John Maynard Keynes aseguró durante una conferencia celebrada en Madrid que la “riqueza producida y los avances tecnológicos reducirían la jornada laboral de 2030 a tres horas diarias, 15 horas semanales”.

También hemos oído que se calcula que el 65% de los niños y niñas ingresando en educación primaria hoy, tendrán que prepararse para trabajos en categorías que todavía no existen.

La idea 5.0 surgió en Japón vinculado al 5º Plan Básico de Ciencia y Tecnología de 2016. Este concepto tiene como objetivo formar una sociedad más inteligente, asegurando el bienestar del ser humano a través de innovaciones tecnológicas. El primer ministro japonés durante la feria de telecomunicaciones digitales CeBIT 2017 en Hannover (Alemania), utilizó esta idea. En mi opinión para aceptar el 5.0 hace falta un mayor consenso, existe siempre mucha necesidad periodística, política e incluso del I+D para declarar que estamos ante cambios sistémicos.

Un segundo punto de reflexión casi obligado, simplemente hay que leer las noticias para ver que estas ideas se centran en países y sociedades económicamente muy desarrolladas. Una gran parte de la humanidad sobrevive ajena a este tipo de ideas, otra lucha por desarrollarse y llegar a un estado de confort razonable. Y sigue existiendo miseria, pobreza, explotación y trabajo infantil, guerras, a las

que se suman las amenazas del cambio climático, tensiones geopolíticas, etc.

Por mi parte añadiré dos opiniones muy subjetivas, la primera que todo el progreso humano también acelera la medicina. Ningún avance en medicina se explicaría fuera del mundo hiperconectado actual; solamente este hecho hace merecer la pena el afrontar las amenazas. La segunda reflexión es aún más personal, con la edad siento que cada día se trabaja más, y que hay que esforzarse más y no menos.

Y añadiré una tercera. Si el 70% del saber humano se ha desarrollado en los últimos 40 años, la formación de un individuo choca con el inexorable hecho de que el ser humano es finito, en capacidades y en edad. El conocimiento necesario para seguir progresando deberá hacerse más colectivo, las formas de enseñar deben ser distintas. Quizás este hecho no casa bien con la tradicional visión que tenemos del triunfo y de la necesidad social de definir gurús, premios nobeles, premios de todo tipo, expertos incuestionables, etc. Un paso adelante es cada día más costoso, dado que la frontera del estado del arte está más lejos. En particular son ejemplos encomiables los de agencias como la NASA que intenta colocar el valor del equipo por delante del líder, y lo muestran en sus trabajos de investigación firmados por decenas de autores o en presentaciones donde lo único que uno recuerda es que era una “presentación de uno o una de la NASA”.

Pero por otra parte es asombroso que el mismo *Homo sapiens sapiens* que vivía en las cavernas, que sufría el acoso de las fieras, hoy día sueña con los múltiples retos de cada una de nuestras especialidades de la ciencia y de la ingeniería.

12. MEDIR ES CLAVE, LA METROLOGÍA

El ser humano midió bastante antes de leer y escribir. La Metrología es la ciencia que se ocupa de la medida. Algunos expertos, tal como indica el Centro Español de Metrología [CEM, 2019], consideran la metrología como invisible e ignorada. No va a ser así en este discurso, la metrología es clave y además la de tipo dimensional se muestra en las ferias de máquinas herramienta del sector, tanto la EMO como la Bienal.

En 1791 la asamblea francesa legalizó el sistema métrico decimal de medida, con el metro como medida de longitud definido por la diez-

millonésima parte del cuadrante del meridiano terrestre, y el kilogramo como unidad de masa, un decímetro cúbico de agua a 4 °C. Ambas unidades se materializaron mediante una barra y un cilindro de platino respectivamente. Este sistema fue el antecesor del actual Sistema Internacional de Unidades, el SI. En 2018, la 26ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) realizó la revisión más importante del SI, ligando las unidades básicas a constantes universales.

La globalización implica intercambiar componentes fiables producidos en distintos lugares del mundo. Es por tanto necesario contar con un sistema global de medida para la armonización internacional de unidades físicas, normas de productos, procedimientos de calibración, evaluación de incertidumbres, etc. La propia coexistencia de sistemas de medidas diferentes es un problema en sí mismo, como ocurre con las unidades imperiales que los países anglosajones siguen utilizando.

12.1 Metrología dimensional

En el ámbito de la fabricación importa sobre todo la metrología dimensional, encargada de magnitudes relacionadas con la longitud: distancias, formas, ángulos, textura superficial, etc. Los planos técnicos recogen mediante simbología normalizada las características funcionales de un componente, que deben ser verificadas para garantizar las especificaciones del plano técnico.

La actividad de medir se realiza en los laboratorios de Metrología Dimensional. En ellos se debe controlar la temperatura, humedad del aire, condiciones de iluminación, aislamiento de vibraciones, así como la limpieza. Este control trata de disminuir la influencia de estos factores en la incertidumbre de las mediciones dimensionales. Sin embargo, la actividad de medición en estos laboratorios supone un cuello de botella para la producción, y adicionalmente implica una toma de decisiones demasiado tardía, comprobar que algo está mal al final no parece una buena forma de impedir trabajo innecesario. Actualmente, se considera que la calidad debe producirse, no solo controlarse al final del proceso.

En los laboratorios de metrología dimensional es habitual encontrar equipos de medida y patrones diseñados hace cientos de años como el micrómetro de tornillo, algunos hitos se muestran cronológicamente en la figura 72. El micrómetro fue inventado por W. Gas-

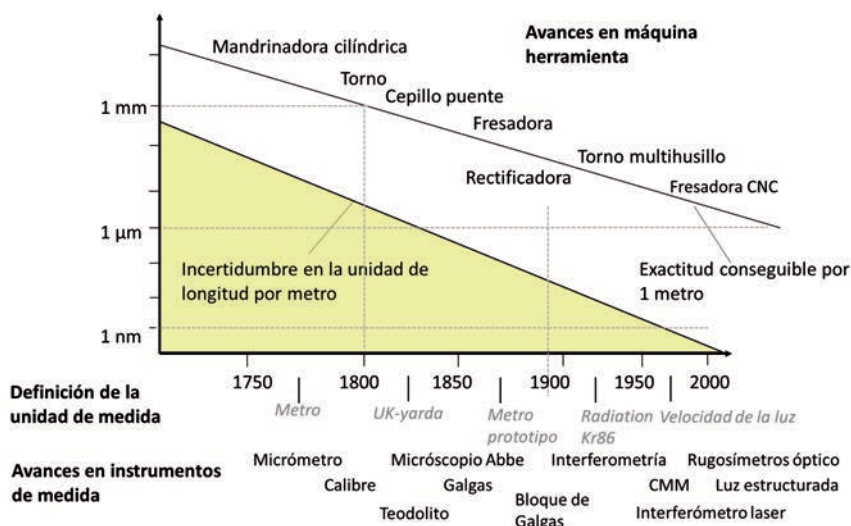


Figura 72: Evolución histórica de la fabricación y medición de la incertidumbre.

coigne en el siglo XVII, y se utilizó en un telescopio para medir distancias angulares entre estrellas. También se encuentran calibres también llamados pie de rey (inventado en el siglo XVII), el reloj comparador (patentado en 1883), interferómetros cuyo primer uso data de 1880. Además de rugosímetros (1920) y máquinas de medir por coordenadas presentadas internacionalmente en 1959 en la EMO (aquel año en París), entre otros. Por otra parte, en los laboratorios de metrología dimensional se guardan los patrones de diferente grado de precisión que materializan dimensiones de Kr86 y formas, y sirven para aportar trazabilidad a las mediciones. Estos ejemplos y muchos otros nos indican que nuestros antepasados diseñaron equipos precisos y versátiles cuyo principio de funcionamiento seguimos empleando hoy en día. Lo tradicional sigue funcionando...y lo hace bien, que en metrología implica hacerlo de forma muy precisa. La regla del 10 dice que: si la tolerancia de un elemento es t , entonces el instrumento utilizado para demostrar el cumplimiento de la especificación debe tener una incertidumbre igual o mejor que $t/10$. Por eso en la figura 72 se muestran los niveles de incertidumbre de producción y de los instrumentos de medida de forma conjunta.

Los instrumentos de medición se clasifican en los que miden de forma directa o indirecta, pero también según la tecnología empleada: mecánicos, ópticos, neumáticos, eléctricos, electrónicos, o hí-

bridos. En los últimos años se observa una carrera hacia la inmediatez y la flexibilidad de la fabricación que debe ser totalmente compatible con un incremento de los requisitos de calidad y fiabilidad del proceso productivo y el producto fabricado. En este contexto, el modelo de fabricación *cero-defectos* se convierte en un nuevo paradigma.

La metrología dimensional es clave en este nuevo contexto, proponiendo la medición directa en producción (*in-process*), y se podrían identificar los siguientes retos metrológicos:

1. Medición rápida para permitir aumentar la productividad.
2. Disminución del componente humano en el proceso de medición y automatización de la medición.
3. Medición precisa en componentes de grandes dimensiones.
4. Medición en escala nano y subnanométrica.
5. Digitalización, almacenamiento en la nube o en *data lakes* de los resultados de la medición para toma de decisiones ágiles.
6. Modelos y sensores virtuales para estimación de la incertidumbre de medida de nuevas tecnologías de medición.
7. Medición masiva de nubes de puntos de la geometría y superficies, con levantamiento topográfico.
8. Medición híbrida, combinación de diferentes equipos y tecnologías para medir completa un componente usando un mismo software para todos.
9. En otro ámbito, la ciberseguridad. Disponer de los datos de medición es como disponer del ADN de nuestro componente. Es información extremadamente sensible.

Todo esto sobre componentes cada vez más complejos, y en algunos casos en escalas y tamaños extremos (>10 m y < 10 μ m), es decir, en componente enormes y diminutos.

12.2 Nuevas tecnologías de medición

En muchas aplicaciones resulta imperante integrar la medición dimensional en los procesos productivos (*in-process*), como si de una etapa más de los mismos se tratara. Las nuevas soluciones deben aportar rapidez en la medición manteniendo la precisión, o al menos con incertidumbre solamente un orden de magnitud superior a la obtenida en laboratorio, y con capacidad de digitalizado. Entre las nuevas soluciones se encuentran las siguientes:

- Escala macro: *laser tracker* y *tracer*, LADAR, LIDAR, radar láser, fotogrametría, escaneo por luz estructurada, escáner láser, tomografía computarizada por rayos-X, entre otros.
- Escala meso: máquinas de medir por coordenadas, escaneo por luz estructurada, escáner láser, redondímetros con palpador interferométrico, tomografía computarizada por rayos-X, y otros.
- Escala micro-nano: Microscopio electrónico de barrido (SEM), microscopio de fuerza atómica, microscopio confocal, máquina de medición molecular, interferometría de luz blanca, microscopía de escaneo de túnel (TEM), micro y nanotomografía, etc.

La metrología dimensional necesita mediciones estables, comparables y coherentes, pero el ambiente de producción es cambiante. Se hace necesario establecer nuevos procedimientos de medida y asignación de incertidumbre integrada en el sistema productivo (máquina herramienta, robot, sistemas móviles, cintas transportadoras, etc.) para obtener el dato de calidad en tiempo real. Esto contribuye a controlar la calidad en etapas intermedias y no solamente al final de la fabricación de un componente, permite corregir problemas, o parar el proceso y eliminar operaciones superfluas sobre piezas irre recuperables.

Ejemplos concretos de la implantación de estas tecnologías en los medios productivos son:

- Ensamblaje de grandes componentes empleando el equipo de láser tracker [Schmitt et al., 2015] [Vikas y Sahu, 2021]. Un láser tracker consta de un sistema de seguimiento láser y reflectores montados en el objeto que se está midiendo. El láser se dirige hacia los reflectores, y el sistema de seguimiento calcula la posición y orientación del objeto.
- Medición digital trazable en máquina herramienta [Mutilba et al., 2017, 2019]. La calibración de máquinas ya se mencionó en la sección 8 de este discurso.
- Medición dimensional trazable mediante tomografía computarizada de rayos-X en componentes complejos fabricados por aditivo [Ortega et al., 2021]. La metro-tomografía utilizando rayos X es la forma de ver y medir el interior de componentes complejos.

Acabamos indicando que la incertidumbre es intrínseca a nuestra observación del entorno, y a todas las escalas y tamaños. A nosotros, al ser humano, nos gusta lo determinista, pero nunca vamos a con-

seguir conocer ni fabricar sin incertidumbre. Mejor admitirlo y sobre ello construir nuestro conocimiento, o desconocimiento. Volvemos a repetir la frase cartesiana adaptada a la metrología, “mido luego existo, de lo demás tengo incertidumbre”. A esto hay que añadir que además muchas veces los que miden son otras personas...los ingenieros debemos fiarnos, ¡o no fiarnos!

13. PERO SON LAS PERSONAS

Ya hemos hablado de tecnología, de avances en varios campos y presentado una imagen del estado del arte de la máquina herramienta a fecha de hoy. Pero sin duda lo que ha permitido que este discurso se celebre aquí hoy y con esta temática es la existencia de un sector nacional importante, que implica a muchas personas trabajando con ahínco para ofrecer a sus clientes buenas máquinas herramienta. Este ámbito industrial reconoce el valor de las personas, que son quienes empujan cada nuevo proyecto y desarrollo.

Personas que se asocian

En 1946 nacía la asociación nacional de fabricantes de máquina herramienta española, gracias al interés de personas que habían fundado empresas y veían conveniente agruparse para aunar esfuerzos de desarrollo del negocio. Más adelante también se creó INVEMA, que permitió unir una dimensión de investigación y desarrollo tecnológico a los campos de marketing, comercialización y presencia internacional. Las personas del sector vieron que podían encontrar elementos de colaboración e intereses comunes, aunque compitiesen en el mercado.



Figura 73: Logos de AFM, de 1946 a 2024. Izda. El logo típicamente del metal. Dcha. Un nuevo logo para una asociación en el nuevo mundo digital.

Un hito importante fue el 3 de marzo de 1961, cuando se celebró la primera edición de la Feria Técnica de la Máquina herramienta, con más de 1500 máquinas españolas en 226 expositores. En la tercera edición de 1966 ya paso a ser bienal y en 1982 alcanzó dimensión internacional. Cada dos años, la edición de la feria de Máquina Herramienta de Bilbao, la Bienal, se ha convertido en el escaparate de la oferta de nuestros productores y también de los importadores de las marcas líderes. Su crecimiento fue una de las razones para la construcción del BEC (*Bilbao Exhibition Centre*), que albergó su primera bienal en 2004. En 2024 se celebra la edición número 32.

Se muestra en la figura 73 el logo fundacional de AFM y el actual, creo que el yunque que se vislumbra indicaba un mundo donde el metal, la mecánica, y el aceite de corte dominaban las empresas, eran los años 1940s. El actual refleja que se ha llegado a un estado donde controles numéricos, robots, sensores y digitalización son parte clave del negocio.

España es el tercer productor y exportador de máquinas herramienta de la Unión Europea y el décimo del mundo. Se exporta como media más del 80% de la producción. El sector destina cerca de un 5 % de la facturación a Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i).

En los últimos años AFM ha entendido que la comunidad de intereses se podía extender a campos cercanos, y se ha abierto a los sectores clave de la fabricación avanzada, entre ellos: a) máquina herramienta, b) fabricación aditiva e impresión 3D, c) herramientas de mano, ferretería y suministro industrial, d) mecanizado y transformación metalmecánica, e) empresas de base tecnológica y *startups*, f) importación y distribución de máquina herramienta, y g) empresas de tecnologías inteligentes para la fabricación avanzada (digitalización industrial, automatización y robótica). Así, actualmente AFM Cluster es la organización que representa los intereses de la fabricación avanzada y digital en España. Agrupa a más de 750 empresas, que emplean a más de 18.500 personas y facturan más de 3.800 millones de euros. Desde su sede en San Sebastián y su implantación en Tianjin (China), AFM Cluster trabaja para promover la internacionalización, el desarrollo industrial y tecnológico, el posicionamiento estratégico y la capacitación de personas en sus empresas asociadas. Como he dicho es un sector muy exportador, no duden que hay máquinas herramienta españolas en múltiples países y rincones del mundo.

AFM es socio de la federación europea CECIMO, que engloba las asociaciones nacionales de industrias de máquinas herramienta y tecnologías de fabricación de países europeos. En total, el sector de máquina herramienta tiene 150.000 empleados directos en Europa y factura unos 25.300 millones de euros.

Un elemento especialmente cuidado es la formación de jóvenes en los campos de fabricación y montaje de máquinas, producción, y formación dual. Por este motivo surgió IMH Campus, un ejemplo de formación cercana a la necesidad de la empresa, y con el que por cierto mi universidad (Universidad del País Vasco) coordina perfectamente su acción. Junto a este centro se ubica el museo de máquina herramienta ya citado, ubicado en Elgoibar.

Tampoco me puedo olvidar de la Sociedad española de fabricación (SIF) que vi y ayudé a nacer en 2004. Las tecnologías de fabricación, el mecanizado en particular y las máquinas herramienta siempre han tenido papel destacado en este foro. Esta sociedad celebra un congreso bienal de carácter internacional, el MESIC. Como asociación es sobre todo un punto de encuentro de académicos y profesionales, unidos por la fraternidad que otorga el saber lo complicado que es fabricar con una precisión de un micrómetro. Tampoco me puedo olvidar de la Asociación de Ingeniería Mecánica, que también ha permitido que las máquinas de todo tipo sean centro de esfuerzos de formación e investigación. Reunir a investigadores, profesores, ingenieros y técnicos de este sector siempre promueve la cooperación y las buenas prácticas. Que existan dos asociaciones con cierta yuxtaposición es algo recurrente en otros países, por ejemplo, en EE.UU. coexisten la ASME y la SME (Society of Manufacturing Engineers).

También recordar a Aspromec, Asociación de Profesionales para la Competitividad del Mecanizado que nace en 2010 con el objetivo de mejorar la competitividad y facilitar la cooperación entre las empresas de mecanizado.

Y déjenme también que haga referencia al centro que dirijo, el Centro de fabricación avanzada aeronáutica, CFAA, donde entre los 110 socios, 5 son del sector aeronáutico, liderados por ITP Aero, pero muchos más socios son fabricantes de máquinas y equipos de producción. Este centro es un buen ejemplo de lugar de colaboración donde los que están pensando en cómo van a ser los motores del 2035 (o más) y que están consiguiendo cumplir o

aumentar las ramp-ups de los programas aeronáuticos, colaboran con las empresas que les pueden dar soluciones tecnológicas, entre ellos de forma preminente los fabricantes de máquina herramienta y equipos de producción. En este centro cada proyecto cooperativo es un paso en la línea de mejorar los medios de producción y transferir tecnología de forma rápida y efectiva. El centro de gravedad de la actividad es el *Technology Readiness Level* TRL 4-6, niveles donde se investiga en entornos representativos y cercanos a las máquinas reales.

Personas que inician, mantienen empresas e inician proyectos

El tamaño medio de la empresa española de máquina herramienta no es grande. Ocho de ellas superan los 200 trabajadores, pero en general suelen ser empresas de 100 a 200 trabajadores y propiedad familiar; compiten con multinacionales japonesas, alemanas, suizas, coreanas y de otros países, con tamaño y músculo financiero mucho mayor. La especialización en nichos de elevado valor añadido es la estrategia general que define a todas ellas; esto significa e implica máquinas muy adaptadas a operaciones y sectores clave, donde el gran productor (sus competidores multinacionales) pierde en especificidad y flexibilidad para adaptarse al cliente. Afortunadamente existe apoyo tecnológico por parte de centros de investigación que sienten la fabricación como algo propio, entre ellos Ideko, Tekniker, Tecnalía, el propio IMH Campus, mi Universidad del País Vasco y CFAA, la Escuela Politécnica de Mondragón, Lortek, Aimen, Ceit, Eurecat, Aimme, la Universidad de Zaragoza o de Sevilla, CATEC, AITIIP, CARTIF, AIN, centre CIM de la UPC, seguramente otros más a los que pido disculpas por la omisión.

Pese al esfuerzo, y repasando el libro “Máquinas y hombres” [Aldabaldetrecu, 2000], algunas empresas se quedaron en el camino, aunque en general sus trabajadores fueron rápidamente absorbidos por otras empresas o por clientes en el mundo de los procesos de fabricación. Seguramente trabajaban en una gama de productos que por tamaño y tipo de clientes los hacía muy expuestos a la competencia internacional, pese al esfuerzo en desarrollar tecnología; ésta no es la única clave del negocio. Por supuesto su esfuerzo no fue en vano, y el conocimiento y experiencia permanece.

Personas que generan valor económico y social

Ya hemos citado la cantidad de puestos de trabajo generados en Europa por el sector de máquinas, al que se añadirían los derivados de herramientas, moldistas, accesorios y un sinnúmero de usuarios de las máquinas herramienta.

Se esperaba que el tamaño del mercado de máquinas herramienta alcanzase los 100.630 millones de dólares en 2023 y creciera a una tasa compuesta anual del 2.92% para alcanzar los 116.190 millones para 2028 [Mordor, 2023], aunque las cifras varían en función de la fuente y tipos de máquinas incluidas. Los principales grupos empresariales son Trumpf Group, Shenyang Machine Tool Group, Falcon Machine Tools, Dalian Machine Tool Group, Amada, DMG Mori, Mazak, FFG-Mag (unión de marcas como Boehringer, Cross Hüller, Ex-Cell-O, y Lamb y otras), Fanuc, Okuma, GROB-Werke, Makino Milling Machine, GF Machining Solutions, Schuler AG, DN Solutions, JTEKT y Haas Automation. En España las empresas Danobat Group (Danobat y Soraluze), Nicolás Correa, Ibarria, Fagor Arrasate también se ubican entre los treinta líderes mundiales. También en este sector destacan empresas no grandes, pero de un gran prestigio en precisión, como Yasda, Sodick, Junkers, Matsuura, Hardinge, Fidia, Pietro Carnaghi, o Walter. No podemos olvidar a Zayer, Lagun, GMTK, Bost, Etxe-tar, M Torres, Guruzpe, CMZ, Geminis, Doimak, GER, Denn, Juaristi, Ekin, Ona electroerosión, empresas de gran reputación y especialización..., no todo es tamaño en este sector. Y tampoco olvidar a grandes empresas alemanas como Heller, Alzmetall, Hermle, Emag, Tornos, Index, Chiron; y citar también la brasileña Romi. Si alguna empresa se me ha olvidado..., perdón por anticipado.

En 2023, Asia-Pacífico representa la mayor cuota de mercado (consumo) en máquinas herramienta. En los últimos 10 años, China ha sido indiscutiblemente el mayor mercado. El eje EE.UU. y México mantuvo su segunda posición como importadores, mientras que Alemania destaca en tercer puesto seguida de Italia. Japón y Corea del Sur también son destacables, a los que se suma India.

Respecto a las ferias del sector, las más prestigiosas son la EMO de Hannover, claramente la líder desde 1951, nuestra Bienal de máquina herramienta, la BIMU italiana, la Metav alemana, la JIMTOFF de Japón, CIMT - China International Machine Tool Show, SIMTOS



Figura 74: Las principales ferias del sector.

en Corea, IMTEX en India y la IMTS de Chicago. Y además se celebran Metal-Madrid o Advanced Machine Tools-Feria Maquinaria Barcelona. En aditivo, la FORMNEXT de Frankfurt es el escaparate mundial, o ICAM (*International Conference on Advanced Manufacturing*). En todas ellas están presentes los fabricantes nacionales. Las ferias son una gran oportunidad para los ingenieros, estudiantes de ingeniería, formadores e investigadores, pues en una semana se pueden contemplar más máquinas reunidas que en dos años. Son microcosmos ubicados en un mismo tiempo y lugar, donde tecnología, comercio, relaciones humanas, etc. se coordinan.

Las conferencias y congresos también son foros activos de intercambio de ideas. A nivel internacional se celebran la Asamblea general del CIRP, el ya citado congreso internacional celebrado bienalmente por la SIF, el congreso de Máquina Herramienta que se celebra desde 1971 en San Sebastián auspiciado por AFM, los coloquios trienales que se celebran en Aachen por el WZL y la Universidad Técnica de Aachen (RWTH, Aquisgrán). Este centro y universidad, junto a otros centros Fraunhofer de esta pequeña ciudad capital de Carlomagno, son la referencia internacional en investigación en máquinas y en procesos. Alemania y Japón son los dos países que marcan el desarrollo tecnológico en máquina herramienta. En ambos países el I+D es apoyado por las empresas y muy generosamente por los gobiernos federal y de los *lander*, o el gobierno japonés. Son países que entienden que investigar en temas industriales conlleva riqueza, que permite a su vez desarrollar otras tecnologías y estructurar la sociedad. Podemos buscar allí algo de inspiración para nuestra nación.

Y más personas

Ya me he referido a todas las personas del sector de máquinas, pero debo hacer mención y honor a más grupos de técnicos.

En primer lugar, a los fabricantes, vendedores y distribuidores de herramientas y accesorios, son parte clave en la solución de un proceso. En el caso de los vendedores de herramienta más bien debiéremos hablar de asesores; un buen asesor lleva soluciones a sus clientes, y hace un papel a modo de juglar moderno que abre una ventana de conocimiento en empresas pequeñas y medianas. La competencia es muy fuerte, los negocios que se juegan importantes, pero impera el juego limpio, la idea de que si otro colega gana un proyecto es porque lo ha hecho mejor; por otra parte, hay muchos clientes y juego por delante.

Los importadores de máquinas también son claves, detectando los mejores equipos a distribuir y desarrollando aplicaciones de apoyo a sus clientes. No son simples distribuidores, son también consultores.

Debo seguir por los usuarios de las máquinas, tanto en empresas grandes y líderes en su sector, o en pequeñas y medianas empresas. Estas últimas son un buen ejemplo de cómo coser un tejido industrial y una cadena de suministro y valor. Algunas de estas pequeñas empresas están en manos de una segunda generación familiar, que busca hacerlas más sólidas e incorporar nuevas tecnologías. En países como Alemania el concepto de empresa familiar es clave en el sector de máquinas y usuarios, pero su tamaño en general dobla o triplica la equivalente nacional. Las empresas deben incorporar capacidad de ingeniería y diseño, y buscar una gama de producto o subcontratación especializada.

En el sector aeronáutico las personas también trabajan duro. En el campo de motor aeronáutico los profesionales se encuentran los materiales de más baja maquinabilidad y los requisitos más exigentes de calidad total. Son realmente una fuerza tractora para las empresas fabricantes de medios de producción. Honor a todos ellos y ellas por su capacidad para innovar y cooperar con empresas y agentes de investigación.

Personas que enseñan y aprenden

Por último, hay que agradecer a los profesionales que se dedican a enseñar el oficio, desde las escuelas de formación profesional a la uni-

versidad. Como ya he dicho, se necesita ofrecer conocimiento y también enseñar los viejos trucos del oficio del noble arte de trabajar metales. Podemos estar orgullosos de la cantidad de escuelas de FP y universidades que en sus programas incluyen cursos exigentes de máquina herramienta o de procesos de fabricación.

Como ocurre en casi todos los campos del saber humano, formación e investigación son un buen tándem; la juventud, un espíritu curioso y con ganas de transformar, una formación bien dirigida y los proyectos de I+D son una base sólida de progreso, a la que se suma la experiencia y la observación de las necesidades reales de cada aplicación.

También es importante el emprendimiento, aunque en mi opinión es ilusorio pensar que unos estudiantes de 23 años vayan a tener una idea clave de un proceso industrial, cuando todavía no han tenido ninguna experiencia real. Pero en Alemania (por dar un ejemplo), sí surgen empresas de investigadores de treinta años que han estado trabajando en proyectos con fuerte colaboración con empresas en etapas previas, son un ejemplo a seguir. En España también existen buenos ejemplos, pero podría haber más.

La carencia de profesionales y estudiantes en ingeniería y tecnología es ya un problema, tanto para las empresas como para los agentes tecnológicos que trabajan para estas empresas. En este sentido juegan en contra varios aspectos de este sector, una localización geográfica dispersa en el territorio y lejos de núcleos urbanos, una idiosincrasia propia por ser empresas familiares muy apegadas a sus territorios y valores, y un tamaño de empresa que los jóvenes a veces no perciben como confortables para sus primeros años de profesión si se compara con empresas grandes o consultoras. En general, ya se está produciendo una transformación y este sector se está preocupando en presentarse como una vía que abre una gran carrera de futuro. Las iniciativas de Aulas de empresa en la universidad, nuevas formas de trabajo posibles, una mayor permeabilización con los clientes, y atraer a talento de otros países o regiones pueden ser soluciones.

Sin personas no hay control numérico o robot que pueda llevar adelante un día a día tan exigente. La fuerza de este sector siempre han sido sus personas, hay que trabajar para que exista relevo generacional.

14. EL FUTURO, ¿ESTÁ NUBLADO?

Sí, está nublado, sí hay nubes y nubarrones, pero siempre con destellos de sol. Hay amenazas al mecanizado surgidas del cambio en los productos de los sectores cliente de la máquina herramienta; algunos de estos cambios son de gran interés para esta Academia y la ingeniería en general:

- Coche eléctrico: sin duda un coche eléctrico disminuirá el número de componentes mecánicos a mecanizar, en el motor muy claramente y en parte de las transmisiones. Es bastante improbable que la demanda de máquinas herramienta pueda mantenerse en las nuevas líneas de producción de coches eléctricos, ya que la producción de automóviles eléctricos requiere menos piezas metálicas de alta precisión.

Seguirá existiendo mecanizado, pero en un volumen de viruta menor. Cigüeñales y árboles de levas desaparecerán. Los engranajes seguirán siendo parte importante en la transmisión desde el motor central a los ejes a las ruedas, y en los diferenciales. A fecha 2024, los vehículos híbridos, que todavía emplean cilindros y pistones siguen ganando popularidad y estos sí tienen estos elementos. Hay otros cambios, como la conducción autónoma o la movilidad compartida que implican cambios sociales. Se prevé que el mercado de automóviles de la UE se contraiga en más de una cuarta parte en diez años, en comparación con los niveles anteriores a la pandemia de 2019.

Pero el sector trata de adaptarse al futuro coche eléctrico. En las ferias se muestran herramientas especiales para mecanizar

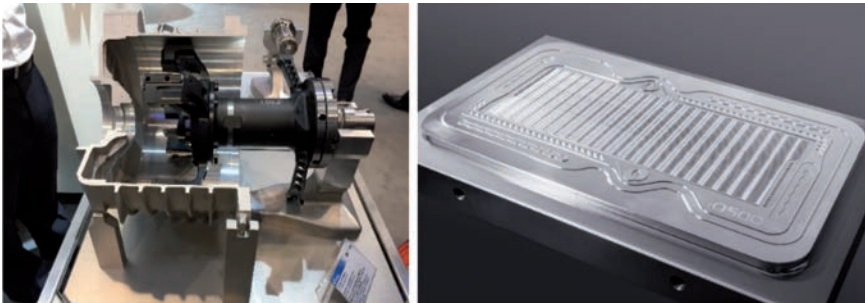


Figura 75: Izda. Herramienta especial de gran diámetro. Dcha. Molde para placas de pila de combustible de membrana de intercambio de protones, de 200 horas de mecanizado en una Makino® IQ500

cajas de baterías y carcasas de motores, se muestran moldes para futuras pilas de combustible, etc. La figura 75 muestra dos ejemplos: una herramienta de gran diámetro para el acabado interior de las carcasas de motores eléctricos, y un molde en acero de dureza 60 HRC para placas de pilas de combustible.

- Fabricación aditiva, como se ha dicho se deberá seguir acabando el componente por mecanizado, pero sin duda se reduce el volumen de viruta por pieza al reducirse las operaciones de desbaste. La fabricación aditiva podría ser una oportunidad para países que no fueron activos en la tercera revolución industrial, pero pueden buscar nichos de aplicación en el campo de la fabricación aditiva, dado que no requiere una cadena industrial tan compleja como otros sectores.
- Cualquier operación de bajo valor añadido o muy generalista se deslocalizará a países de menor coste laboral. Sin embargo no es una regla absoluta, por ser las dinámicas de mercado muy complejas.
- Reparaciones, se trata de una actividad de gran margen de beneficio, pero sometido al albur del azar de las averías. En algunos países puede ser un nicho de negocio, pero debe ir acompañado de algún producto propio; sin producto propio es casi imposible amortizar un equipo complejo y costoso. En Iberoamérica este hecho es importante [López de Lacalle et al., 2014] dado que hay muchas empresas dedicadas a reparar equipamientos de ingeniería, minería y de ingenios azucareros, o de otras empresas del sector de alimentación. Un ejemplo se muestra en la figura 76, la reparación de tornillos tras la cosecha de la caña de azúcar.



Figura 76: Izda. Tornillo sinfín de grandes dimensiones que debe repararse tras la zafra de la caña de azúcar. Dcha.) Detalle del desgaste tipo y magnitud de deterioro.

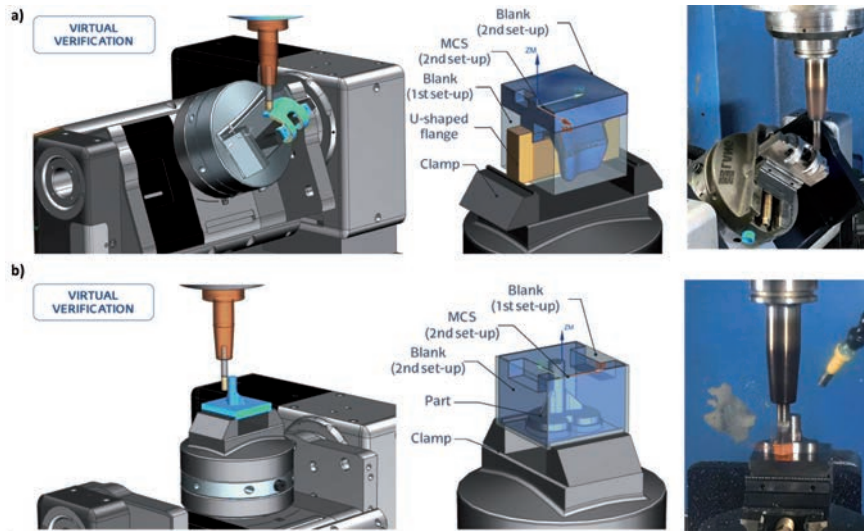


Figura 77: Fresado de prótesis de rodilla con lubricación de CO_2 , amarres y secuencias [Gómez *et al.*, 2022].

- Prótesis e industria dental. Todo lo que sea metálico se debe mecanizar. El valor añadido es elevado. El quid de la cuestión es enlazar bien con el sistema sanitario y conocer la demanda concreta. El mercado global de dispositivos ortopédicos crecerá hasta alcanzar los 50.000 millones de euros en 2024. Los componentes ortopédicos se mecanizan a partir de barras y piezas fundidas o forjadas, que después se rectifican y se pulen. Una aleación típica es el cobalto-cromo CoCr28Mo6 , pero la aleación de titanio Ti6Al4V Grado 5 es la más común.

En general el titanio necesita lubricación para su fácil mecanizado, lo que aumenta el riesgo de contaminación de las prótesis. Una idea que ayuda a disminuir el riesgo es la lubricación criogénica utilizando CO_2 [Gómez *et al.*, 2022], además reduce el impacto ambiental y fue premiada por esta academia con el López Peñalver de 2023.

14.1 Oportunidades

Como vengo hablando en el apartado anterior, hay amenazas pero se abren también oportunidades, de hecho las he ido mezclando. Una de ellas es el sector aeronáutico, tanto en componentes del fuselaje



Figura 78: Izda. Rotores integrales diámetro (0,7 m). Ctr) Impeller y blisk (blade on disk) en Ti6Al4V producidos en 2015 en la UPV/EHU. Dcha. Fresas para estas operaciones.

como en el motor. Este sector comparte muchas tecnologías con la automoción, pero con unos requisitos muy distintos, donde la seguridad se impone sobre todos los demás. Un ejemplo donde el mecanizado (fresado en cinco ejes) es muy relevante es el de los rotores integrales, que se fresan desde un bloque inicial que procede de laminación o forja. Se trata de operaciones de 4 ó 5 horas, cuya motivación es obtener la pieza de menor peso y más resistencia, sin uniones mecánicas o soldadas (ver figura 78). En este caso hace falta fresadoras de cinco ejes muy precisas, nuevas ideas de herramientas de corte, y mucho saber hacer.

En aeronáutica el valor añadido es muy elevado, y además existe una protección de los proveedores, tanto por imagen de marca como por la gran adaptación de los medios a la necesidad del cliente. Por otro lado, las máquinas son de gran tamaño, que favorece a los productores de máquinas nacionales. Las perspectivas de mercado son brillantes, se prevé que antes del 2040 se va a duplicar y reemplazar la flota existente, lo que implica más de 40.000 aeronaves y al menos 80.000 motores a entregar. España es uno de los 9 países del mundo con tecnología de motor propia (ITP Aero) empresa con gran efecto tractor, y hay otras empresas también líderes en el campo del fuselaje (Aernnova).

También el campo de espacio y satélites puede empujar a nuestra industria de fabricación, aunque por volumen será menor. La empresa Sener ha apostado por nuevo centro en Zamudio (Bizkaia) que desarrollará y producirá sistemas electromecánicos, equipos optomecánicos, sistemas de actuación y robóticos.



Figura 79: Izda. Fresadora Soraluze® en mecanizado de bujes de aerogeneradores.
Dcha. Fresadora de N.Correa®.

Otro sector donde el tamaño del componente a fabricar es un factor decisivo es el de la energía, bien hidroeléctrica y eólica, donde el mecanizado es importante (ver figura 79). Los productores nacionales están muy bien posicionados en los mercados donde el tamaño de las máquinas es grande, además hay que adaptarlas para cada cliente, y conocer las aplicaciones es el elemento diferenciador.

Tampoco debiéramos olvidar el sector de defensa, que es estratégico para una nación como la española. Los proyectos de defensa conllevan desarrollo dual de tecnología e industrialización. Hay buenos ejemplos en España de cómo desde una sólida base de fabricación se puede construir un vector de producto en este sector. No hablaré más dada la confidencialidad debida en este sector. Pero en mi opinión, en el mundo actual mejor trabajar en tus sistemas que comprarlos, y así tener el beneficio añadido de la tecnología dual de aplicación a otros sectores. Como decía un colega: “o te haces tus sistemas y generas tejido industrial, o te los hacen, los compras y nada más los pagas”.

Otro campo es el micromecanizado y mecanizado de componentes de ultraprecisión para lentes, instrumentos científicos y sistemas láser, también necesarios en la tecnología médica y en la fabricación de moldes. Una fresadora de micromecanizado o de ultraprecisión [Uriarte *et al.*, 2005] desarrollada por Tekniker se muestra en la figura 80.

Por tanto debemos ser optimistas, la máquina herramienta y los mecanizadores españoles se van a adaptar a los cambios, como ya lo han hecho otras veces. Y seguirán siendo parte fundamental del tejido de nuestra industria, el colágeno de la misma en muchos casos, y punto de partida para promover la incorporación de nuevas tecnologías a los sectores clientes.

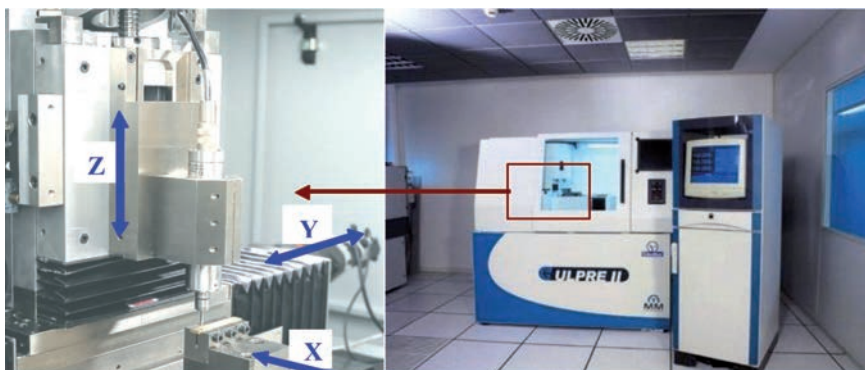


Figura 80: Microfresadora Ulpre II desarrollada por Tekniker-BRTA.



Figura 81: Los grandes proyectos los realizan personas, y su formación es clave.
Dos imágenes del CFAA de Zamudio.

Pero todo se deberá a las personas que son hoy los que empujan en estas empresas, no a los robots. Y en clave de futuro, mañana seremos lo que consigan los que hoy formamos. La formación..., ésta es la clave para que el progreso sea continuo. Las personas de estos sectores, ellos y ellas son los y las que han permitido y seguirán consiguiendo que nuestra industria esté en el estado del arte de la tecnología, o lo superen en algunos aspectos.

14.2 Sostenibilidad

La sostenibilidad y reducción del impacto ambiental están calando tanto en productores de equipos como en usuarios. Se trabaja en varios campos:

- Disminución del uso de líquidos refrigerantes y lubricantes (talladinas), que son fuente de contaminación y coste. Evidentemente su uso y reciclaje está muy regulado, y se cumple de forma exhaustiva. En este campo el ideal sería el del mecanizado en seco, pero eliminar los fluidos de corte es muy difícil dada su eficacia para evacuar el calor inherente al proceso de corte. Una alternativa en algunas aplicaciones es el MQL (Mínima cantidad de lubricante) que consiste en micropulverizar aceites vegetales en la zona de corte. En los últimos años también se ha introducido la posibilidad de uso de gases criogénicos, nitrógeno líquido LN2 o dióxido de carbono CO₂, estos gases al expandirse de líquido a gas reducen mucho la temperatura de corte. La idea se muestra en la figura 82.



Figura 82: Sistema BeCOLD® para lubricación combinada con CO₂ criogénico e instalación en una fresadora.

- Reducción del consumo eléctrico de las máquinas. El mecanizado y otros procesos de trabajo de metales consumen energía, inherente a la necesidad de procesar los materiales. Se ha trabajado en dos aspectos, uno es apagar los sistemas de las máquinas que no se emplean en una aplicación, el otro optimizar los procesos y las máquinas para aumentar su eficiencia.
- Mantenimiento. Según numerosos estudios, el uso del mantenimiento predictivo permite reducir el tiempo total de inactividad de las máquinas en un 30-50%, al tiempo que aumenta su vida útil en un 20-40%. La conexión de las máquinas a las redes de datos permite la tele asistencia, bien para determinar los problemas, o bien para modificar algún parámetro del control numérico. El servicio de asistencia técnica es un punto clave para el usuario y que las empresas deben cuidar. La figura 83 muestra la pantalla de monitorización de 3 máquinas del CFAA.



Figura 83: La monitorización es clave para rebajar el consumo, al conocer los procesos. Pantalla en el centro de control del CFAA graficando datos de tres de las máquinas.

- *Retrofitting* o readaptación. Tras siete, diez o más años de funcionamiento, los componentes mecánicos de las máquinas herramienta suelen seguir en buen estado. Sin embargo, las tecnologías de control y accionamientos siguen mejorando constantemente, introduciendo nuevas funciones que hacen que la producción pueda ser más eficiente y precisa. El retrofiting (perdónenme..., todo el mundo lo llama así) es un proceso que mejora las especificaciones originales de la máquina herramienta mediante la sustitución de componentes, módulos o la incorporación de nuevas tecnologías de control que prolongan su vida útil. Es habitual en a) grandes máquinas, algunas muy valoradas por ser de fundición que mejora y se hace más estable con el tiempo, o b) en aquellas máquinas automáticas por dispositivos mecánicos y que trabajan con aceite puro en vez de emulsiones, lo que las protege de la oxidación y desgaste, y hace que sean muy longevas (toros de levas, máquinas de fabricar engranajes). Un ejemplo de retrofiting se muestra en la figura 84.

Hay un mercado ágil de máquinas de segunda mano, es decir, se les suele sacar todas las posibilidades que otorga su vida física. La organización Cecimo publicó su informe *The incredible life of a machine tool: from birth to the beginning of a new cycle* [CECIMO, 2022], que muestra algunas pautas de sostenibilidad en el sector.

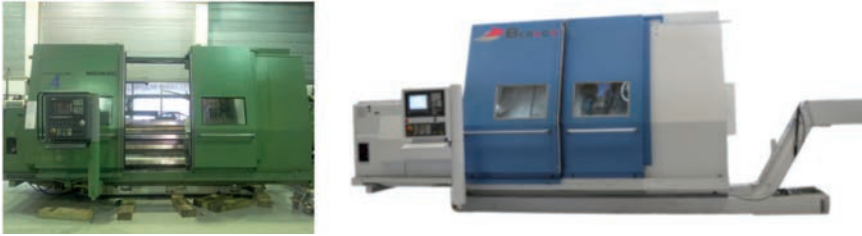


Figura 84: Retrofitting, un ejemplo por Berkoa®: torno MAX MÜLLER-GILDEMEISTER antes y después de la actualización.

Además de las máquinas y procesos, se debe tener especial consideración al entorno y a la propia factoría. La figura 85 muestra los factores implicados en el balance energético de una empresa de mecanizado. El 25% de gasto es atribuible al edificio, 30% a sistemas auxiliares, 30% al proceso de mecanizado y el resto a otras actividades. Actuando de una forma global quizás se llegase a disminuir un 40% de energía. Es muy destacable el reciente esfuerzo de varios centros de investigación alemanes en la disminución del consumo e impacto, habiendo puesto en el centro del I+D este objetivo.

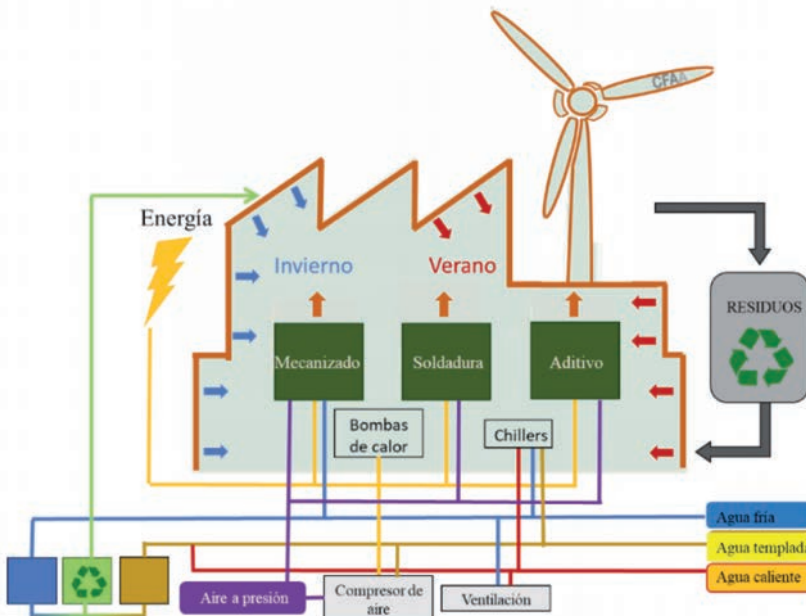


Figura 85: Procesos y sistemas que consumen energía en una empresa de mecanizado (basado en ideas del PTW de Darmstadt).

En Europa surgen directivas que buscan asegurar la economía circular, estableciendo un *pasaporte digital de producto*, es decir, registrar todos los datos específicos en formato digital sobre un producto concreto, al que se accede por medios electrónicos. De esta forma el impacto y ciclo de vida de un producto (o la propia máquina herramienta) será accesible a los consumidores.

14.3 La investigación y desarrollo

En mi actividad profesional me he dedicado al I+D+i, y fruto de algunos años, esfuerzos y algún éxito, me parece importante resaltar algunos puntos. Primeramente, me gustaría indicar que tenemos suerte de trabajar en un país donde hay recursos para realizar investigación. También debo indicar que en mi carrera me encontré, encuentro y encontraré, colegas en empresas, centros tecnológicos y universidades que son verdaderos promotores del desarrollo tecnológico de la ingeniería en general. De nuevo son las personas el motor y promotor del cambio y los proyectos.

Podríamos citar muchos casos de éxito y programas de financiación concretos, pero por citar algunos exitosos:

- Convocatorias de apoyo a grupos de investigación en periodos de 3 a 6 años, que marcan financiación estable.
- Todas las convocatorias donde se financia a las empresas, pero se obliga a subcontratar a universidades y agentes. Las iniciativas concretas pueden variar en cada administración, pero es un instrumento que en el medio plazo hace (de forma poética) que los spines de las empresas y de los agentes tecnológicos se alineen. La constancia en este esquema ha hecho surgir verdaderas alianzas perdurables en múltiples sectores, y en producción industrial también.
- La investigación en fabricación implica disponer de medios reales, algunos fabricantes de máquinas ya han conseguido tener presencia en centros de investigación y formación con máquinas versátiles, de tamaño reducido o incluso de tamaño medio. El centro de formación e I+D no puede considerarse el propio negocio, sino el medio para llegar a mayor cuota de mercado.

El sistema de I+D+i español existe y es rico en agentes, la palabra clave a promover es mejorar su “eficiencia”. Para ello me atrevo a dar algunos aspectos de mejora:

1. En España siempre existe una dicotomía entre lo que es investigación básica y aplicada, por una parte, y la que se realiza cerca de la industria por otra. Es algo palpable, dado que se articula entre diferentes ministerios, conserjerías e incluso entre distintos vicerrectorados en algunas universidades.
2. Hay que romper esas fronteras dado que los jóvenes se forman en universidades, allí se promueven tesis doctorales, y por otra parte las empresas necesitan apoyo. Para ello debe cambiar de orientación y las formas de colaborar los agentes implicados, incluso proponiendo ideas heterodoxas. Un investigador, o un ingeniero con ese talante e interés, puede surgir de unas prácticas o un trabajo de fin de grado o de máster. Es la que podríamos denominar "cantera". E incluso aunque estas personas no se dediquen en su carrera profesional estrictamente a labores de I+D, se les quedará el gusanillo dentro y serán sensibles a la investigación y desarrollo.

La transformación debe venir por promoverse la colaboración desde las convocatorias públicas: obligar a centros a tener un número mínimo de doctores, obligar a proyectos mixtos, financiar alianzas de empresas con centros y universidades, dobles filiaciones, empujar a la universidad a proponer tesis doctorales bien orientadas, y hacerlo en periodos largos y no con continuas convocatorias. El resultado final debe ser que todos los agentes, incluida la universidad, ganen y sean más eficientes y eficaces en su apoyo a nuestros sectores económicos. Y que más jóvenes se encaminen por la senda de la investigación y desarrollo. En breve, si para recibir financiación un agente y empresa deben colaborar, al final acabarán haciéndolo y generarán nuevas dinámicas; el primero orientará su actividad a problemas reales, la segunda empezará a tener cierta cercanía al agente. Si se prosigue, surgirán alianzas perdurables, las mentalidades irán cambiando en ambos extremos.

El CFAA trabaja en TRLs 4 a 6 para 110 empresas y no tiene NIF aparte de la universidad. Es un centro en la propia universidad, con la ventaja de poder incluir a alumnado desde grado a doctorado, incluir post-docs y miembros de las empresas. Además, colabora con el centro Ideko-BRTA y en muchos proyectos con otros centros. ¿No es un ejemplo de un nuevo modelo? Y si funciona este modelo... ¿por qué no replicarlo en otros campos

y lugares? Se debe reconocer que hay algunas cortapisas originadas por los múltiples reglamentos, leyes, voluntades o ideas encorsetadas.

3. En los campos de ingeniería los indicadores de producción del I+D deben ser mixtos. No pueden ser solo de tipo producción científica, que además dan lugar a trabajos que al publicarse en abierto no protegen el conocimiento. Por otra parte, la investigación no debe solo orientarse por el retorno económico a corto, que hace que se vista de I+D las formas de innovación más simples. Ambos extremos son muy negativos. Buscar un equilibrio debe ser el objetivo, y quizás lo único que debe cambiar entre la ingeniería y/o otros campos es hacia dónde cae el ligero desequilibrio. En ingeniería debe caer hacia la aplicabilidad en nuestras empresas, poniendo las fronteras que enmarcan el “nuestras” en un marco que puede ser regional, nacional o europeo. Un desequilibrio equilibrado, podríamos resumir.
4. La industria es un motor económico y social para un país como España, es indudable. Se sumará a otras fuentes de riqueza de nuestro país como el turismo, agricultura, etc. Es mucho más fácil destruir este tejido que formarlo. Por tanto, debemos pensar en cómo internacionalizarlo y cómo incluir a más técnicos de otros países. Esto requiere también generar un entorno social atractivo, como mejores apoyos al alojamiento de los ingenieros e investigadores, aumentado el nivel de conocimiento de idiomas en nuestras escuelas y en la propia calle, entre otros. De esta forma, se conseguirá atraer a España a trabajar y a practicar la ingeniería a muchos estudiantes y jóvenes..., y no tan jóvenes.
5. Que las empresas ejecuten I+D+i es casi ya una obligación, la empresa que no esté en este camino tiene un futuro al menos incierto. Quizás el único punto que debiera mejorarse es la valoración del personal dedicado al I+D, la contratación de doctores, favorecer que parte de los técnicos puedan realizar el doctorado, y definir una progresión en la empresa basada en desarrollo técnico y no solamente la gestión.
6. En otros países sabemos que ser doctor es muy valorado en la empresa y sociedad, Alemania es el claro ejemplo. En los proyectos europeos es muy habitual trabajar con una universidad o centro alemán, con investigadores que hacen el doctorado. No cobran una beca mileurista, sino un sueldo de mercado que

no les penaliza. Tras 4 ó 5 años se doctoran o no, y pasan a las empresas, muchas veces aquellas que fueron sus colaboradores en los proyectos de investigación.

7. Es una realidad que no puede analizarse con los mismos criterios casos tan diversos como la ingeniería, con enorme oferta de empleo, con otros campos de muy baja demanda. En España tener una beca del nivel del salario mínimo para hacer el doctorado en ingeniería, es casi heroico; no hay candidatos o si los hay muchas veces no serán los mejores. En otros países las becas/ayudas son mucho más altas y además la sociedad premia con prestigio el esfuerzo, bien sean países de elevado nivel industrial y desarrollo social (Suecia) o países más emergentes (China).

Tampoco está bien resuelta la necesidad de multidisciplinaridad que surge de muchos retos tecnológicos, y en general los programas de doctorado no facilitan esta nueva necesidad.

8. La bajada del interés por las carreras técnicas impactará aún más en la investigación industrial, ya que las empresas contratan egresados primeramente para su misión principal, realizar su producción y actividad diaria. Es un problema ya hoy, será un problema aún mayor a medio plazo. Evidentemente el pleno empleo es algo para alegrarse, cómo no. Pero quizás ese estudiante de 23 años, muy prometedor e inteligente que podría ser un gran investigador, sea contratado demasiado tempranamente.
9. Otro apunte respecto a las empresas. El espíritu innovador depende más de la filosofía de la empresa y del carácter de sus técnicos, que de su tamaño. Tanto para empresas grandes como pequeñas con una idea de cómo innovar, el efecto incentivador de las ayudas y financiación conseguidas es realmente así, incentivador. Un proyecto concreto, una convocatoria en particular son pasos en una misma dirección.
10. En mi entorno hemos perdido oportunidades en fomentar empresas nuevas que lancen al mercado productos basado en modelos y utilidades que apoyen a los usuarios. Se han realizado muchas tesis, muchos proyectos que podrían haber dado lugar a aplicaciones vendibles. Estas aplicaciones serían a su vez motivos para que la empresa usuaria contratase más servicios y ayudase a que el producto mejore. Creo detectar que estos dos últimos años algunas empresas están surgiendo en otros países como Alemania y Gran Bretaña que siguen esta idea.

11. Y un penúltimo punto, no es muy recomendable que un investigador ya senior pase gran parte de su tiempo leyendo la letra pequeña de las múltiples convocatorias que surgen cada año. Bienvenidas sean, pero debiera haber convocatorias bien financiadas para marcos estables de I+D. Como en ingeniería somos gente práctica, hay que reconocer que la petición de propuestas suele ser un tiempo activo de intercambio y generación de ideas, de abrirse a colaborar con nuevos compañeros de viaje. No hay mal que por bien no venga. Sin embargo, la enorme tasa de fracaso en muchas convocatorias es demolidora para la moral de muchos jóvenes y además una pérdida de tiempo y desencanto general. En proyectos europeos es enorme, debiera haber alguna repesca ofrecida por la administración central.
12. Evidentemente el dinero de financiación del I+D no es infinito, y el mérito debe ser el principal punto a evaluar. Pero este aspecto puede ser compatible con formas más estables de financiación, que en parte existen pero debieran ser más generales y/o habituales.

En general podríamos decir que la concepción del I+D+i en la industria debiera incluir a muchos niveles de técnicos de una empresa, más aún en temas como la máquina herramienta y sus procesos donde hay mucho truco del oficio. El que maneja la máquina puede saber necesidades que surgen de la realidad del día a día y marcar las necesidades.

Podríamos decir que el sector de máquina herramienta y el de producción vienen haciendo los deberes, han promovido la investigación y desarrollo, invierten fondos y confían en centros y universidades. También han cuidado la formación de estudiantes en IMH campus y el Aula de Máquina Herramienta en la Escuela de Ingeniería de Bilbao por dar dos ejemplos que conozco. Existe un tejido de I+D bien estructurado. Se han hecho las cosas bien, se debe seguir por esa senda, se podría aumentar la eficiencia del sistema; los retos de la tecnología y sus oportunidades crecen y se necesita trabajar en una misma dirección.

15. MI EXPERIENCIA Y VISIÓN SUBJETIVA

Permítanme ahora que vuelva a hablar desde mi perspectiva personal, y así siga en la línea con la que comencé este discurso.

Desde los primeros momentos de mi actividad en el campo de la fabricación empecé a conocer gentes, ingenieros, técnicos y de otras profesiones que de forma tenaz y constante se han dedicado a este sector. Hombres y hoy día también mujeres acostumbrados siempre a pedalear, a no dormirse cuando las cosas van bien, y a buscar oportunidades.

Los técnicos tienen orgullo de pertenencia a sus empresas. Respecto al empleo, éste es un sector muy estable, leal y bien pagado. Incluso en las peores crisis se busca tomar impulso, innovar y hasta ser optimista.

Por darles un ejemplo personal que se me hace familiar, un momento donde se ve que además de grandes profesionales son personas de a pie y con calidez humana. Este momento es cuando en las EMO o en la Bienal o en otro foro, tras acercarse el reloj a las 5:45 ya muy cerca de la hora de cierre, te invitan a una cerveza y se cruzan comentarios sobre cómo ha ido el día, preguntas del tipo “¿habéis visto algo interesante?”, es que no me he podido mover del stand...”, o te cuentan algo de aquel proyecto de innovación que les gustaría abordar, seguramente para ver si te pueden involucrar en él. Incluso en ese momento de asueto puedes ver el compromiso con su papel en la empresa, pues les queda ánimo para atender a ese último cliente rezagado que puede ser un posible comprador, no se escape un negocio al final. Vender una máquina es mucho para estas empresas, su tamaño no es grande, perder un cliente porque duelan un poco los pies no se puede consentir. Como suelen decir, en este negocio o no se come por estar en crisis o no se duerme por estar en plena vorágine de pedidos. Pero luego siguen con la cerveza y contigo...aunque ya sin mucha espuma.

En otros muchos casos atienden y otorgan su tiempo a los alumnos de mi escuela o de otras, y explican al detalle las novedades tecnológicas que muestran, incluso cuando saben que a ti como universitario es difícil que te vayan a vender nada.

También debo comentar el sentimiento de cercanía cuando se visitan empresas mecanizadoras, grandes o pequeñas, cada una de ellas con su problema urgente del día y buscando soluciones. Son

gente realista y amable, que agradecen el interés otorgado a sus problemas. En unos casos la solución puede ser dar una idea, asumir alguna suya y darles una opinión, o simplemente la solución es compleja y no tener respuestas. En todo caso, en cada visita a una empresa se aprenden buenas y nuevas formas de hacer.

Cómo decirlo..., acercarse a este sector es una sensación de camaradería y cierto reto, uno podría acordarse de aquel clásico y magistral discurso de San Crispín de la obra Enrique V (Shakespeare), *"we few, we happy few, we band of brothers..."*, solo quizás habría que añadir hoy *"band of brothers and sisters"*, y no lo digo por corrección política, sino por el verdadero esfuerzo integrador que este sector siempre intenta en la búsqueda del mejor talento.

En mi opinión, se debe seguir colaborando en contribuir a la fortaleza del sector con unos valores en cuanto a apego al territorio y tradición que pueden ser claves para la atracción de talento, y que posibilitan estabilidad y capacidad para afrontar malos tiempos. Tanto el fabricante de máquinas como los múltiples talleres se deben abrir a recibir nuevo talento de otros lugares, aprender de las formas y maneras de trabajo en otros campos que atraen hoy mucho a nuestros jóvenes, y dejar claro que cualquier recién llegado va a tener un acompañamiento en formación en sus primeros años de trabajo en la empresa. La internacionalización, la competencia internacional y los rápidos cambios tecnológicos obligan a cambiar la forma de entender cómo crecer y tener éxito en los negocios.

Para terminar, simplemente decir que sí, que son máquinas herramienta, son grandes y muy automatizadas, y que seguirán en el corazón de nuestros sectores claves. Pero por impresionantes que sean, dependen intrínsecamente del impulso humano, de su saber, tenacidad y buen hacer. Estas personas saben que al igual que en una bicicleta, después de descender porque las condiciones son favorables se enfrentarán a la inevitable ascensión. Conscientes de que, aunque el viento pueda soplar a su favor en un momento, la dirección puede cambiar en cualquier instante. Solo personas con amor a su trabajo pueden llevar adelante esta carrera, que en España es carrera de fondo.

De ahí el título escogido para este discurso..., sí, son máquinas herramienta, sin artículo, pero son las personas, con artículo definido y cada una de ellas, las que han posibilitado que yo esté hoy aquí dando este discurso y sea admitido como miembro en esta Academia que representa el saber y las buenas prácticas en ingeniería.

16. CONCLUSIONES

Claramente el hablar de máquinas podría haberse extendido a numerosos campos de la ingeniería y de la producción en general, dado que las máquinas son bienes de equipo que se encuentran en el corazón de muchos sectores. Pero los límites de un discurso deben definirse y en mi opinión en las páginas precedentes he abarcado puntos que considero claves y esenciales. A modo de resumen, la tabla 4 muestra algunas de las ideas y clave de la evolución entre 1900 y 2024.

TABLA 4. RESUMEN DE ALGUNOS AVANCES EN MÁQUINA HERRAMIENTA, EN TRES PUNTOS HISTÓRICOS REPRESENTATIVOS

Hacia 1910	Alrededor de 1990	2024
Máquinas herramienta universales	Centros de mecanizado Tornos CNC	Centros de mecanizado Fresadoras 5-ejes, máquinas multitarea
Control manual de máquinas herramienta o automatización mecánica	Sistemas CNC, mecanizado multieje	Control inteligente, aprendizaje automático
Un trabajador controla una máquina	Un trabajador controla varias máquinas	Supervisión humana de procesos muy automatizados
Herramientas de acero rápido HSS	Herramientas de metal duro, plaquitas reemplazables con múltiples filos de corte	Herramientas de metal duro con nuevos recubrimientos y herramientas cerámicas
Mantenimiento regular, reparación después de una avería	Predicción de desgaste, mantenimiento periódico o basado en umbrales	Monitorización en tiempo real de los componentes del sistema, procesos de recalibración fingerprint
Reemplazo manual de herramientas, evaluación aproximada estado del filo	Reemplazo automático de herramientas, corrección de desgaste por software	Control en tiempo real de las condiciones de corte, decisiones automatizadas con en reemplazo de herramientas
Transmisión por correa o engranaje desde el motor central al husillo	Husillo motorizado por motor eléctrico, accionamientos con motores	Husillo motorizado con compensación activa Motores de par
2ª revolución industrial	3º revolución industrial	4º revolución industrial
Sin conexión a redes	Conexión punto a punto, primeras conexiones por red	Integrada en redes de datos, inminente 5G

Llegando a este punto daremos algunas conclusiones:

- La máquina herramienta es un manipulador espacial muy rígido, que mueve una herramienta con velocidad y precisión para ejecutar un proceso de fabricación. En su diseño, montaje y uso se necesitan conocimientos profundos de ingeniería mecánica, de los procesos de fabricación, de electrónica, de hidráulica y neumática, de control y recientemente del mundo de la ciencia de datos y de las telecomunicaciones. La máquina herramienta es un ejemplo de integración tecnológica.
- España es el noveno productor mundial de máquina herramienta, y este hecho se fundamenta en que en el siglo XX personas trabajadoras fundaron empresas y desde entonces han mantenido constante el interés por la innovación tecnológica. Cuando en una feria internacional nuestras empresas enseñan y venden sus máquinas, hacen marca España, y esto ocurre cada mes y en muchos lugares del mundo. Muchas de ellas tienen un gran arraigo al territorio por su idiosincrasia como empresa familiar o cooperativa.
- Existe un buen tejido nacional de formación tanto en máquinas como en su uso, existe arte, oficio y experiencia en el corte de metales, del conformado y otros procesos. Pese al éxito, debe seguir apoyándose la formación tanto reglada como continua a lo largo de la vida laboral. Es un sector de elevada capacitación, bien pagado, leal en las relaciones laborales. Formar un buen técnico lleva años tanto de formación reglada como aprendizaje continuo y experiencia. Sigue teniendo algo de gremial en el sentido del aprendizaje maestro-aprendiz, la formación necesita incluir los trucos del oficio.
- El sector es un buen medio instrumental para hacer llegar a los sectores clientes los avances tecnológicos. Apoyar al productor de máquinas implica apoyar a sus usuarios. Por tanto, puede utilizarse a los fabricantes de máquinas como caballos de Troya para introducir nuevas tecnologías en sectores clave como automoción, aeronáutica, médico, defensa. Esta estrategia (ver figura 86) de empuje acelera que los avances impacten en varios sectores simultáneamente, de tal forma que las nuevas funciones que mejoran productividad, calidad o minimización del impacto ambiental lleguen a muchos puntos.

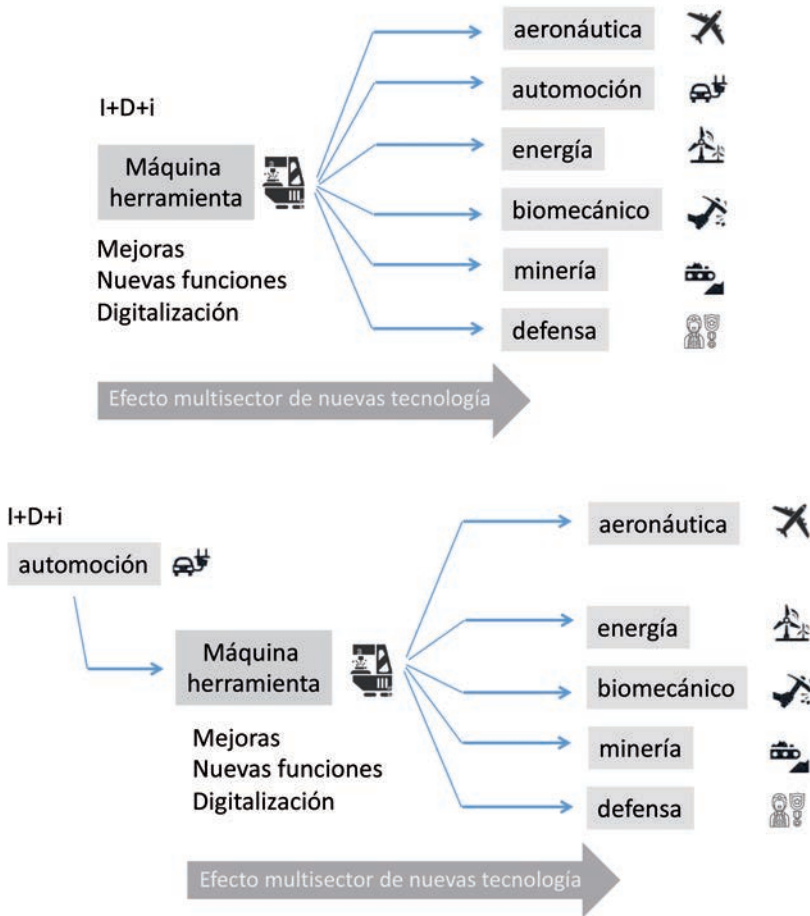


Figura 86: Estrategia de apoyo a la innovación: Izda. Empuje. Dcha. Tracción, un ejemplo por necesidades del sector de automoción.

- La estrategia de tracción, apoyando a los clientes finalistas también es efectiva, pero se tarda un poco más en permeabilizar los avances de forma transversal entre sectores; como suele suceder, la convivencia de ambas políticas es la adecuada y genera múltiples sinergias.
- Las máquinas son en sí un producto y como tal se considera un sector finalista, pero a su vez es un medio de producción para sus clientes. Son bienes de equipo por un lado y tecnologías habilitadoras de otros sectores por otro.

- No hay una amenaza sistémica para este sector. El mecanizado, el estampado de chapa, etc. son procesos que tienen futuro, y además el sector ha acogido en su seno las tecnologías emergentes de fabricación aditiva, incorpora día a día a empresas de base tecnológica, digitalización industrial, y a otras. Podemos confiar como sociedad en estos ingenieros, en estos técnicos y directivos, en estas personas comprometidas con generar valor para su entorno.
- La fabricación aditiva se ha considerado parte de este sector, como una tecnología más, siendo una solución viable para nichos de aplicación de elevado valor añadido.
- Las personas en este sector han estado sometidas a muchos cambios tecnológicos, han visto y sufrido muchas crisis y ciclos económicos. De hecho, saben aprovechar el viento a favor, es parte de su ADN, pero también capear el temporal es parte de su arte. Su resiliencia es elevada.
- El sector es muy sensible a los ciclos económicos, que sufre con antelación dado que la maquinaria surge de la necesidad de inversión de otros sectores. Se suele considerar la demanda de máquinas como un indicio anticipado de la evolución económica.
- El sector de fabricación debe esforzarse aún más de lo que hace por atraer el interés de los y las estudiantes de ingeniería, es una acción estratégica que requiere mucha constancia y abrirse a recibir tecnólogos de otros lugares del mundo.
- Las máquinas herramienta proponen problemas tecnológicos complejos, como son las deformaciones térmicas, vibraciones de chatter, problemas de control, etc. que para la ingeniería implican un reto. La mecánica de precisión y la máquina herramienta utilizan principios similares.

Afortunadamente las crisis sufridas han hecho recapacitar a la sociedad europea sobre lo importante que es apoyar a su industria, definiendo cuatro objetivos claves que deben liderarse desde empresas y academia, y apoyarse desde la administración, estos son:

- Garantizar el liderazgo europeo y la excelencia en la fabricación.
- Lograr una fabricación circular y climáticamente neutra.
- Dominar la transformación digital de la industria manufacturera.
- Crear empleos de fabricación atractivos y con valor añadido.

Fabricar es clave, fabricar es generar valor añadido y retornar muchos de los esfuerzos de inversión en desarrollo y en diseño. Y para fabricar hacen falta máquinas precisas y con elevada productividad y flexibilidad.

Éste que aquí les habla se siente orgulloso de pertenecer a este grupo de personas, y es un honor poder ser una voz del sector en la Academia. Un sector amplio dado que incluye desde los fabricantes de máquinas a los usuarios de las mismas. Y si alguno o alguna de ellos, desde los más jóvenes a los más maduros, leen o echan un vistazo a este discurso, mi gran satisfacción sería que pensasen “éste..., éste es uno de los nuestros”.

17. AGRADECIMIENTOS

Para elaborar este discurso se han tomado ideas de los libros *Machine Tools for High Performance Machining* y de *Mecanizado de alto rendimiento*, por tanto hay que agradecer a todos los coautores allí presentes, y especialmente a los ingenieros y profesores Aitzol Lamikiz, Gorka Urbikain y Naiara Ortega que me han echado una mano con alguna sección del discurso. También se agradecen las ideas y detalles precisos otorgados por el Dr. Jokin Muñoz y Beñat Ibabe, del centro IDEKO-BRTA, del Dr. Juanjo Zulaika y Dra. Asun Rivero de Tecnalia-BRTA. Agradezco a los doctores que he tenido el honor de dirigir sus tesis doctorales, a quienes he incluido como referencias en muchos casos dado que he utilizado sus ideas.

Reitero mi agradecimiento a la Academia y a los Académicos por considerarme merecedor de ser miembro.

Un sentido agradecimiento a todos los investigadores del CFAA; si este centro existe es por su esfuerzo y motivación, ¡qué pequeño milagro hemos producido! En cuanto a las empresas del centro, un recuerdo a Plácido Rodal que se nos fue muy pronto, y gracias a los ingenieros Raúl Llorente, Jaime Fdz. Castañeda, evidentemente a Alfredo López-Díez, cuyo padre fue Académico y estuvo en la cocina del centro en su origen, y a otros ingenieros de ITP Aero, Edurne, Iker, Mikel, Marta, Héctor, etc. También agradecer a la presidenta del consorcio de empresas, la ingeniera Nerea Aranguren, de Ideko-BRTA. Y gracias a los ingenieros y técnicos de las empresas del CFAA, empresas que he intentado mencionar como ejemplos en algunos apartados de este discurso.

Los datos del sector se han recogido de AFM cluster. Agradeciéndoles a esta asociación y a sus directivos, Xabier Ortueta y Patricia Tames, creo que extendiendo el agradecimiento a todas y cada una de las personas del sector. Son muchos, son muchas, no correré el riesgo de que se me olvide alguno. Pero debo mencionar por nuestra larga relación a Koldo Arandía y Arrate Olaitz de Ibarria, así como a José María Ramos, de Ona Electroerosión, que es quizás la empresa de más larga relación con nuestro grupo. A nuestro colega José Antonio Sánchez hay que agradecer iniciar esta colaboración y mantenerla en el tiempo, y por los años de colaboración en la universidad.

También agradezco a mis colegas periodistas técnicos, que me abrieron los ojos al mundo real de las ferias. No solo hay que hacer buenas máquinas, también vender y saber hacerlo es parte del éxito.

En esta profesión cuentas con maestros y profesores, tanto en temas técnicos como en competencias que hoy día se denominan habilidades sociales. Los colegas en diversos centros formativos y empresas asumimos la tarea de transmitir conocimiento, recordando la sabia frase de Séneca: “docendo discimus” (enseñando, aprendemos).

Durante mi vida profesional y personal, tuve la suerte de que conocidos y desconocidos me ayudaran: igual pensé que era buena suerte, pero eran personas comprometidas con su trabajo. Gracias, a Asier L. que ha posibilitado que yo esté aquí.

En mi Departamento de Ingeniería Mecánica hay buenos colegas y mucho saber. Al Prof. Rafael Avilés le agradezco la oportunidad de pertenecer a este grupo bien cohesionado. Y gracias al personal de administración del mismo, por tanta cosilla por resolver y los ratillos de charla amena. La Escuela de Ingeniería de Bilbao y la Universidad del País Vasco han sido donde poder desarrollar una parte importante del trabajo sobre máquinas y procesos.

Gracias también a los colegas de allende los mares que me han apoyado, Alex Elías y Daniel Olvera de TEC Monterrey, Daniel Mtz. Kraemer del INTI de Argentina, entre otros de esta gran comunidad iberoamericana. *Acknowledgments are due to my colleagues from various European, American, and Indian universities; collaborative efforts consistently yield fruitful outcomes.*

Desde mi corazón surge el agradecimiento a mi familia, a mi mujer Blanca y a mis hijas Ainhoa e Irene. No hay mayor proyecto que tener una familia que te apoya y se ilusiona con tus logros, o sufre con

tus problemas. Parece que mis hijas han tomado la senda de la ingeniería, algo parece que he conseguido inspirar.

Un recuerdo emocionado a mis padres Norberto y María Luisa, que ya no están aquí; imagino que mi padre nunca anticipó un logro académico como éste, y que mi madre estaría emocionada pensando más en lo contento que estoy que en la propia dignidad de ser académico. Mis dos hermanos Alicia y Patxi también comparten estos sentimientos. Y al resto de mi familia, y a Charo, que siempre están para apoyar y ayudar.

En este momento me he quedado sin palabras. Ésta es una expresión formal de agradecimiento y además es un buen final para un discurso.

18. REFERENCIAS

Las referencias al estado del arte se hacen complejas, dado que muchos avances son realidades industriales que no conllevan publicaciones de carácter científico, siendo difundidas en ferias, catálogos, y magazines. He tratado de utilizar referencias básicas, libros bien conocidos en el estado del arte, compendios magistrales o *keynotes*, y tesis doctorales dado que son resúmenes extensos de investigaciones de 3 o 4 años. Las patentes son otra fuente de conocimiento, pero de muy difícil evaluación.

Pero los autores principales están recogidos, aunque en un campo tan extenso como la máquina herramienta y sus sectores clientes las referencias podrían ser casi infinitas.

- [1] Abdulshahed A.M., A. P., Fletcher S. (2015), The application of ANFIS prediction models for thermal error compensation on CNC machine tools, *Applied Software Computing*, vol. 27, pp. 158–168
- [2] Abele E., Altintas Y., Brecher C. (2010), Machine tool spindle units, *CIRP Annals*, vol. 59, n. 2, 2010, pp. 781-802
- [3] Aldabaldetrecu P., Ortuondo P. (2000), Máquinas y Hombres (Machines and men, in Spanish, Basque and annotations in English), Ed. Museo de Máquina herramienta de Elgoibar
- [4] Aldekoa I., del Olmo A., Sastoque L., Sendino S., López-Novoa U., López de Lacalle L.N.(2023), Early detection of tool wear in electromechanical broaching machines by monitoring main stroke servomotors, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 204, 110773
- [5] Altintas Y. (2000), *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics. Machine Tool Vibrations and CNC Design*, Cambridge University Press
- [6] Altinta Y., Budak E. (1995), Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling, *CIRP Annals*, vol. 44, n. 1, pp. 357-362
- [7] Amigo F.J., Urbikain G., Pereira O., Fernández Lucio P., Fernández Valdivielso A., L.N. López de Lacalle (2020), Combination of high feed turning with cryogenic cooling on Haynes 263 and Inconel 718 superalloys, *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 58, pp. 208-222
- [8] Amigo F.J., Urbikain G., López de Lacalle L.N., Pereira O., Fernández Lucio P., Fernández Valdivielso A., Prediction of cutting forces including tool wear in high-feed turning of Nimonic® C-263 superalloy: A geometric distortion-based model, *Measurement*, vol. 211, 112580

- [9] Archenti A., Laspas T. (2019), Accuracy and Performance Analysis of Machine Tools. In: Gao, W. (eds.) *Metrology. Precision Manufacturing*. Springer, Singapore
- [10] Armarego, E.J.A., Brown, R.H. (1969), *The Machining of metals*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs
- [11] Arrazola P.J., Özel T., Umbrello D., Davies M., Jawahir I.S. (2013), Recent advances in modelling of metal machining processes, *CIRP Annals*, vol. 62, n. 2, pp. 695-718
- [12] Arrazola P.J., Kortabarria A., Madariaga A., Esnaola J.A., Fernandez E., Cappellini C., Ulutan D., Özel T., (2014) On the machining induced residual stresses in IN718 nickel-based alloy: Experiments and predictions with finite element simulation, *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 41, February 2014, pp. 87-103
- [13] Astarloa A., Wahab F., Mancisidor I., Fernandes M.H., Etxaniz I., Muñoa J. (2023), Reluctance-Based Modular Active Damper for Chatter Suppression in Boring Bars With Different Overhangs, in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*
- [14] Beaman J.J., Barlow J.W., Bourell D.L., Crawford R.H., Marcus H.L., McAlea K.P. (1997), *Solid Freeform Fabrication: A New Direction in Manufacturing with Research and Applications in Thermal Laser Processing*, Springer
- [15] Bediaga I. (2009), *Supresión del chatter regenerativo mediante variación en proceso de la velocidad de giro*, Tesis doctoral, Universidad del País Vasco, noviembre de 2009
- [16] Beudaert X., Franco O., Erkorkmaz K., Zatarain M. (2020), Feed drive control tuning considering machine dynamics and chatter stability, *CIRP Annals*, vol. 69, n. 1, 2020, pp. 345-348
- [17] Boothroyd G., Knight W.A. (1989), *Fundamentals of Machining and Machine Tools*. Marcel Dekker Inc.
- [18] Bravo-Suarez U. (2007), *Un procedimiento para la predicción de la estabilidad dinámica en el fresado a alta velocidad de paredes delgadas*, Tesis doctoral, Universidad del País Vasco, octubre de 2007
- [19] Brecher C., Weck M. (2021), *Machine Tools Production Systems 1*, Springer Verlag
- [20] Bryan J. (1967), International Status of Thermal Error Research, *CIRP Annals*, vol. 16, pp. 203, July 1967, presented at CIRP general assembly in Ann Arbor, Michigan
- [21] Bryan J. (1990), International Status of Thermal Error Research (1990), *CIRP Annals*, vol. 39, pp. 645-656, January 1990

- [22] Calleja A. (2015), Método de fabricación de componentes de alto valor añadido por combinación de mecanizado multieje y aportación láser, Tesis doctoral, Universidad del País Vasco, abril de 2015
- [23] CECIMO (2022), The incredible life of a machine tool from birth to the beginning of a new cycle, www.cecimo.eu
- [24] Centro Español de Metrología e Instituto de la Ingeniería de España (2019), La Metrología también existe, Edita: Centro Español de Metrología
- [25] Coro A., Macareno L.M., Aguirrebeitia J., López de Lacalle L.N. (2019), A Methodology to Evaluate the Reliability Impact of the Replacement of Welded Components by Additive Manufacturing Spare Parts, *Metals*. 2019, vol. 9, n.9, pp. 932
- [26] D.Te-Yen Huang, Jyh-Jon Lee (2001), On obtaining machine tool stiffness by CAE techniques, *Int. Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 41, pp. 1149–1163
- [27] De la Luz Sosa J., Olvera D., Urbikain G., Martínez O., Elías A., López de Lacalle L.N. (2020), Uncharted stable peninsula for multivariable milling tools by high-order homotopy perturbation method, *Applied Sciences*, vol. 10, n.21, 7869
- [28] Díaz-Tena E., Ugalde U., López de Lacalle L.N. et al. (2013), Propagation of assembly errors in multitasking machines by the homogenous matrix method. *Int. J. Advanced Manufacturing Technology*, vol. 68, pp. 149–164
- [29] Dornfeld D., Dae-Eun Lee (2008), Machine design for precision manufacturing. In: *Precision Manufacturing*. Springer verlag USA
- [30] Ealo J.A., Garitaonandia I., Fernandes M.H., Hernández J.M., Muñoa J. (2018), A practical study of joints in three-dimensional Inverse Receptance Coupling Substructure Analysis method in a horizontal milling machine, *Int. Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 128, pp. 41-51
- [31] Erdel B.P. (2003), *High-speed machining*, Society of Manufacturing Engineering, Dearborn, Michigan
- [32] Evans C. (1989), *Precision Engineering: an Evolutionary View*, Cranfield Press, Bedford UK
- [33] Fernández-Albia A. (2012), Metodología para el análisis del comportamiento y caracterización de los aceros inoxidable austeníticos en el torneado de alto rendimiento, Tesis doctoral, Universidad de León, marzo de 2012
- [34] Fernández de Larrinoa J. (2015), Optimización de procesos de recubrimiento para herramientas de corte. Tecnologías de recubrimiento, métodos de caracterización y optimización de las propiedades, Tesis doctoral, Universidad del País Vasco, 2015
- [35] Fernández Valdivielso A. (2023), Un método de establecer condiciones óptimas de mecanizado de aleaciones de baja maquinabilidad atendiendo a consi-

- deraciones de integridad y productividad, Tesis doctoral, Universidad del País Vasco, enero de 2023
- [36] Floud Roderick (1975), *The British Machine Tool industry (1850-1914)*, Cambridge university press, Londres
- [37] Gameros A., Lowth S., Axinte D., Nagy-Sochacki A., et al., (2017), State-of-the-art in fixture systems for the manufacture and assembly of rigid components: A review, *Int. Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 123, pp. 1-21
- [38] Gao W., Soichi Ibaraki, M. Alkan Donmez, Daisuke Kono, Mayer J.R.R., Yuan-Liu Chen, Szipka K., Archenti A., et al. (2023), Machine tool calibration: Measurement, modeling, and compensation of machine tool errors, *Int. Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 187, 104017
- [39] Garitaonandia I., Fernandes M.H., Albizuri J. (2008), Dynamic model of a centreless grinding machine based on an updated FE model. *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, vol. 48, n. 7-8, June 2008, pp. 832-840
- [40] Gómez-Acedo E. (2014), *Mejora de la precisión en máquinas herramienta de grandes dimensiones mediante la medida y compensación de las deformaciones térmicas*, Tesis doctoral, Universidad del País Vasco, enero de 2014
- [41] Gómez-Escudero G., Jimeno Beitia A., Martínez de Pissón Caruncho G., López de Lacalle L.N. et al. (2021), A reliable clean process for five-axis milling of knee prostheses. *Int. J. Advanced Manufacturing Technology*, vol. 115, pp. 1605-1620
- [42] González-Barrio H., Calleja-Ochoa A., López de Lacalle L.N., Lamikiz A. (2022), Hybrid manufacturing of complex components: Full methodology including laser metal deposition (LMD) module development, cladding geometry estimation and case study validation, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 179, 2022
- [43] Gonzalo de Francisco O. (2013) , *Metodología sistemática para la obtención de coeficientes de corte en modelos mecánicos de fresado*, Tesis doctoral, Universidad del País Vasco, febrero de 2013
- [44] Hernández-Becerro P. (2020), *Efficient Thermal Error Models of Machine Tools*, ETH Zurich, Tesis doctoral, abril de 2020
- [45] Hocken R. (Chairman) (1980), *Machine tool accuracy*, Report of working group 1 of the machine tool task force, UCRL-52960-S. Lawrence Livermore Laboratories, University of California, Livermore, CA
- [46] Holgado I., Pérez-Salinas C., Ortega, N., López de Lacalle L.N., del Olmo, A. (2023), An Intelligent Machine Learning Based Method for Tool Wear Estimation in the Vertical Broaching Process. *Proceedings of the XV Ibero-American Congress of Mechanical Engineering. IACME 2022*. Springer
- [47] Hsu Y.Y., Wang S.S. (2007), Mapping geometry errors of five-axis machine tools using decouple method. *Precision Technology*, vol.1, pp.123-132

- [48] International Standard ISO 841: Industrial automation systems and integration - Numerical control of machines. Coordinate system and motion nomenclature (2001), International Organization for Standardization
- [49] Iñigo-Ibabe B., Lopez de Lacalle L.N., Aguirre G. (2023), Characterization and uncertainty analysis of volumetric error variation with temperature, *Precision Engineering*, vol. 81, pp. 167–182
- [50] Irino N., Kobayashi A., Shinba Y., Kawai K., Spescha D., Wegener K. (2023), Digital twin based accuracy compensation, *CIRP Annals*, vol. 72, pp. 345–348
- [51] ISO/ASTM 52900: 2021 (2021), Additive manufacturing. General principles- Fundamentals and vocabulary
- [52] Jiang, S., Tang, C., Li, X. et al. (2020), Discrete element modeling of the machining processes of brittle materials: recent development and future prospective. *Int. J. Advanced Manufacturing Technology*, vol. 109, pp. 2795–2829
- [53] Johnson G.R., Cook W.H. (1983), A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures. In: *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*, Netherlands
- [54] Klocke F. (2011), *Manufacturing Processes 1: Cutting*, Springer Verlag
- [55] Kurnadi M.S., Morehouse J., Melkote S.N. (2007), A workholding optimization model for turning of ring-shaped parts. *Int. J. Advanced Manufacturing Technology*, vol. 32, pp. 656–665
- [56] Lamikiz A. (2003), *Un modelo para la estimación de las fuerzas de corte en el fresado de superficies complejas*, Tesis doctoral, Universidad del País Vasco, junio de 2003
- [57] Lamikiz A., Camacho A., Ferrándiz S., Batista M., (2023), *Fabricación Aditiva*, UNED, ISBN:9788436279450
- [58] Liu C., He W., Chu J. et al. (2021), Molecular Dynamics Simulation on Cutting Mechanism in the Hybrid Machining Process of Single-Crystal Silicon. *Nanoscale Research Letters*, vol. 16, pp. 66
- [59] López de Lacalle L.N., Lamikiz A., Muñoa J., Sánchez J.A. (2005), The CAM as the centre of gravity of the five-axis high speed milling of complex parts, *Int. Journal of Production Research*, vol. 43. n.10, pp. 1983–1999
- [60] Lopez de Lacalle L.N., Lamikiz A. (2009), *Machine Tool Performance and Precision*, *Machine Tools for High performance machining*, Springer Verlag
- [61] López de Lacalle L.N., Lamikiz, A., Sánchez. J.A., Salgado M.A. (2007), Tool-path selection based on the minimum deflection cutting forces in the programming of complex surfaces milling. *Int. Journal of Machine Tools and Manufacturing*, vol. 47, pp. 388–400

- [62] Lopez de Lacalle L.N., Martínez-Krahmer D. (2014), Una guía para la mejora de los procesos en las provincias de menor desarrollo de la R. Argentina, INTI-UE
- [63] López de Lacalle L.N., Sánchez, J.A., Lamikiz, A (2009), Mecanizado de alto rendimiento: procesos de arranque, Ediciones técnicas Izaro
- [64] Marinescu I.D., Ispas C., Boboc D. (2002), Handbook of machine tool analysis, Marcel Dekker
- [65] Markopoulos A.P., Karkalos N.E. & Papazoglou E.L. (2020), Meshless Methods for the Simulation of Machining and Micro-machining: A Review, Arch Computational Methods Engineering, vol. 27, pp. 831–853
- [66] Mayr J., Jedrzejewski J., Uhlmann E, et al. (2012), Thermal issues in machine tools, CIRP Annals, vol. 61, pp. 771–791
- [67] McKeown P.A. (1987) The role of precision engineering in manufacturing of the future. CIRP Annals, vol. 36, n.2, pp. 495–501
- [68] Melkote S., Liang S., Özel T., Jawahir I.D., Stephenson D. A, Wang B. (2022), 100th Anniversary n. of the Manufacturing Engineering Division, A Review of Advances in Modeling of Conventional Machining Processes: From Merchant to the Present , J. Manuf. Science Engineering, vol. 144(11), 110801
- [69] Merchant M. E. (1944), Basic Mechanics of the Metal Cutting Process, ASME, J. Applied Mechanics, vol. 11, n.3, pp. 168–175
- [70] Merritt H.E. (1965), Theory of Self-Excited Machine-Tool Chatter: Contribution to Machine-Tool Chatter Research, J. Engineering for Industry, Nov 1965, vol. 87, n.4, pp. 447-454
- [71] Michalec M., Svoboda P., K upka I., Hartl M. (2021), A review of the design and optimization of large-scale hydrostatic bearing systems, Engineering Science and Technology, an International Journal, vol. 24, n. 4, 2021, pp. 936-958
- [72] Mordor Intelligence (2023), Tamaño del mercado de máquinas herramienta y análisis de acciones tendencias de crecimiento y pronósticos (2023 - 2028)
- [73] Muñoz J., Beudaert X., Dombovari Z, Altintas Y., Budak E., Brecher C., Stepan G. (2016), Chatter suppression techniques in metal cutting, CIRP Annals, vol. 65, n. 2, 2016, pp. 785-808
- [74] Muñoz J., Beudaert X., Erkorkmaz K., Iglesias A., Barrios A., Zatarain M. (2015), Active suppression of structural chatter vibrations using machine drives and accelerometers, CIRP Annals, vol. 64, n. 1, 2015, pp. 385-388
- [75] Mutilba, U., Gomez-Acedo, E., Kortaberria, G., Olarra, A, Yagüe-Fabra, J.A. (2017), Traceability of On-Machine Tool Measurement: A Review, Sensors, vol. 17, n.7, 1605
- [76] Mutilba, U. (2019), Traceable onboard metrology for machine tools and large-scale systems, Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza, 2019

- [77] Mutilba, U., Sandá, A., Vega, I., Gomez-Acedo, E., Bengoetxea, I., Yagüe Fabra, J.A. (2019), Traceability of on-machine tool measurement: Uncertainty budget assessment on shop floor conditions, *Measurement*, 135, pp. 180-188
- [78] Ortega N., Plaza S., Pascual A., Holgado I., Lamikiz A. (2021), A methodology to obtain traceability for internal and external measurements of Inconel 718 components by means of XRCT, *NDT & E International*, 120, 102436
- [79] Ostolaza M., Arrizubieta J.I., Lamikiz A., Ukar E. (2023), Study of the flexural behaviour and bonding strength of WC-Co metal matrix composite coatings produced by Laser Directed Energy Deposition, *Surface and Coatings Technology*, vol. 463, 129538
- [80] Oxley P.L.B. (1989), *The Mechanics of Machining: An Analytical Approach to Assessing Machinability*, Ellis Horwood Limited, Chichester, England.
- [81] Pérez-Ruiz J.D., López de Lacalle L.N., Urbikain G., Pereira O., S. Martínez, Bris J. (2021), On the relationship between cutting forces and anisotropy features in the milling of LPBF Inconel 718 for near net shape parts, *Int. Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 170, 103801.
- [82] Pérez-Ruiz J.D. (2023), A methodology for optimizing LPBF components design based on crystallographic texture induced anisotropy considering post-processing operations by machining, Tesis doctoral, Universidad del País Vasco, 2023
- [83] Pérez-Ruiz J.D., Marin F., Martínez S., Lamikiz A. , Urbikain G., López de Lacalle L.N. (2023), Stiffening near-net-shape functional parts of Inconel 718 LPBF considering material anisotropy and subsequent machining issues, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 168, 108675
- [84] Puma-Araujo S.D., Olvera D., Martínez-Romero O. , Urbikain G., Elías A., López de Lacalle L.N. (2020), Semi-active magnetorheological damper device for chatter mitigation during milling of thin-floor components, *Applied Sciences*, vol. 10, n. 15, 5313
- [85] Rivero A. (2011), Un método para el taladrado de aluminio que facilita la unión por remaches de componentes aeronáuticos, Tesis doctoral, Universidad del País Vasco, marzo de 2011
- [86] Rodríguez A., González M., Pereira, O., López de Lacalle L.N., Esparta, M. (2023), Edge finishing of large turbine casings using defined multi-edge and abrasive tools in automated cells. *Int. J. Advanced Manufacturing Technology*, vol. 124, pp. 3149–3159
- [87] Rodriguez-Prieto J. (2013), Numerical modelling of metal cutting processes using the Particle Finite Element Method, Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, 2013

- [88] Salgado M.A. (2005), Mejora de la precisión en el mecanizado de superficies mediante ponderación de las fuerzas de corte y sus efectos, Tesis doctoral, Universidad del País Vasco, febrero de 2005
- [89] Salgado M.A., López de Lacalle L.N., A. Lamikiz J. Muñoa, J.A. Sánchez (2005), Evaluation of the stiffness chain on the deflection of end-mills under cutting forces, *Int. Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, n. 6, pp. 727-739
- [90] Schmitt R.H., Peterek M., Morse E., Knapp, W., Galetto M., Härtig F., Goch G., Hughes, B., Forbes A., Estler W.T. (2016), Advances in Large-Scale Metrology – Review and future trends. *CIRP Annals*, 65 (2), pp. 643-665
- [91] Slocum A.H. (1992), *Precision Machine Design*, Society of Manufacturing Engineers
- [92] Taberero I., Lamikiz A., Martínez S., Ukar E., Figueras J., (2011), Evaluation of the mechanical properties of Inconel 718 components built by laser cladding, *Int. Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 51, n. 6, 2011, pp. 465-470
- [93] Taniguchi N. (1974), On the basic concept of nanotechnology, *Proceedings of the International Conference on Production Engineering Tokyo, (Tokyo ASPE)*, Part 2, pp.18–23
- [94] Taniguchi N. (1983), Current Status in, and Future Trends of, Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing. *CIRP Annals*, 1983, vol. 32, pp. 573–582
- [95] Taylor F.W. (1907), On the art of cutting metals, *Trans. ASME* 28 (1907), pp. 31–350
- [96] Taylor F.W. (1911), *The Principles of Scientific Management*, <https://gutenberg.org/ebooks/6435>
- [97] Te-Yen Huang D., Jyh-Jon Lee (2001), On obtaining machine tool stiffness by CAE techniques, *Int. Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 41, n. 8, 2001, pp. 1149-1163
- [98] Tlusty G. (2000), *Manufacturing processes and equipment*. Prentice Hall
- [99] Tobias, S.(1965), *Machine Tool Vibration*, Blackie & Son, 1965
- [100] Uhlmann E., Enrico Barth, Tobias Seifarth, Maximilian Höchel, Jörg Kuhnert, Almut Eisenträger (2021) Simulation of metal cutting with cutting fluid using the Finite-Point set-Method, *Procedia CIRP*, vol.101, pp. 98-101
- [101] Urbikain G. (2014), Metodología para el estudio de vibraciones autoexcitadas en torneado mediante uso de polinomios de Chebyshev, Tesis doctoral, Universidad del País Vasco, noviembre de 2014
- [102] Urbikain G., López de Lacalle L.N., MoniThor: A complete monitoring tool for machining data acquisition based on FPGA programming, *SoftwareX*, vol. 11, 100387

- [103] Urbikain G., Olvera D. (2020), Model-based phase shift optimization of serrated end mills: Minimizing forces and surface location error, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol.144, 106860
- [104] Urbikain G., Campa F.J., Zulaika J.J., López de Lacalle L.N., Alonso M.A., Collado V.(2015), Preventing chatter vibrations in heavy-duty turning operations in large horizontal lathes, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 340, pp. 317-330
- [105] Urbikain G., Olvera D., López de Lacalle L.N., Elías A. (2016), Spindle speed variation technique in turning operations: Modeling and real implementation, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 383, pp. 384-396
- [106] Urbikain G., López de Lacalle L.N, Fernández A. (2012), Regenerative vibration avoidance due to tool tangential dynamics in interrupted turning operations, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 333, n. 17, pp. 3996-4006
- [107] Urbikain G., López de Lacalle L.N., Campa F.J., Fernández A., Elías A. (2012), Stability prediction in straight turning of a flexible workpiece by collocation method, *Int. Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 54–55, pp. 73-81
- [108] Uriarte L., Herrero A., Zatarain M., Santiso G., López de Lacalle L.N., Lamikiz A., Albizuri J. (2007), Error budget and stiffness chain assessment in a micro-milling machine equipped with tools less than 0.3mm in diameter, *Precision Engineering*, vol. 31, n. 1, pp. 1-12
- [109] Urreta H. (2017), Guíados lubricados activos para máquinas herramienta de precisión basados en fluidos magnéticos y válvulas adaptativas, Tesis doctoral, Universidad del País Vasco, julio de 2017
- [110] Van Luttervelt C.A., Childs T., Jawahir I. S., Klocke F. Venuvinod, P. K. (1998), Present Situation and Future Trends in Modeling of Machining Operations Progress Report of the CIRP Working Group Modeling of Machining Operations, *CIRP Annals*, vol. 47, vol. 2, pp. 587–626
- [111] Vikas, Sahu, R.K. (2021), A review on application of laser tracker in precision positioning metrology of particle accelerators. *Precision Engineering*, vol. 71, pp. 232-249
- [112] Wang, Z., Cai Y., Luo X. (2019), Modelling and Simulation of Cutting Process by Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH): A Review, 25th International Conference on Automation and Computing (ICAC), Lancaster, UK, pp. 1-6
- [113] Weck M. (1984), *Handbook of Machine Tools: Types of machines, forms of construction, and applications*, Wiley, 1984
- [114] Yang Y., Muñoz J., Altintas Y. (2010), Optimization of multiple tuned mass dampers to suppress machine tool chatter, *Int. Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 50, n. 9, pp. 834-842

- [115] Yoram Koren (1983), *Computer Control of Manufacturing Systems*, McGraw Hill, Inc., 1983, 287 ISBN 0-07-035341-7
- [116] Zulaika J.J. (2011), *Un método para la concepción de fresadoras de gran volumen productivas y ecoeficientes*, Tesis doctoral, Universidad del País Vasco, junio de 2011
- [117] Zulaika J.J., Campa F.J., Lopez de Lacalle L.N. (2011), *An integrated process-machine approach for designing productive and lightweight milling machines*, *Int. Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 51, n 7-8, pp. 591-604

CONTESTACIÓN

EXCMO. SR. D. JAIME DOMÍNGUEZ ABASCAL

Excelentísimas señoras y señores académicos, señoras y señores

Los actos de recepción de nuevos académicos siempre son especiales para la Academia. Es un acto de reconocimiento al nuevo académico, al tiempo que se abren en la Academia nuevas expectativas ante la incorporación de un nuevo ingeniero, experto de reconocida valía que seguro que aportará su experiencia y participación activa en los proyectos de esta institución.

Me ha correspondido a mí en este caso el honor de responder al nuevo Numerario, algo que hago con sumo placer, dada su trayectoria profesional, y agradecimiento a mis compañeros por mi designación para este acto.

Considerando los objetivos de la Academia, que se pueden resumir en la promoción de la calidad y la competencia de la Ingeniería, podemos ver que es lo que Luis Norberto hace desde que en 1989 se incorporó como profesor a la en aquella época denominada Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Bilbao. Hacía pocos años que en aquella escuela había comenzado el cambio progresivo de profesorado a tiempo parcial a profesorado a tiempo completo, con el beneficio que ello supuso para el desarrollo de la Escuela y las nuevas posibilidades de formación y promoción de ingenieros jóvenes como era entonces López de Lacalle.

Se incorporó al Departamento de Ingeniería Mecánica, que en aquellos años estaba en proceso de crecimiento con entusiastas profesores, liderados por Profesor Rafael Avilés. Luis Norberto se centró principalmente en la Ingeniería de Fabricación y en cómo incorporar las nuevas ideas sobre automatización e integración de sistemas de producción a los programas de formación de los nuevos ingenieros.

Luis Norberto se incorpora a un área de gran relevancia en el País Vasco, en una época en que había comenzado la reestructuración industrial y en la que la industria metalmeccánica aportaba el 35% del valor añadido bruto industrial. Esta área es por la que apostó y sigue apostando la política económica de la citada comunidad, y en cuya I+D participaba activamente la red de centros tecnológicos que habían surgido en esos años. La relación con estos centros siempre ha sido muy cuidada por el profesor López de Lacalle y su grupo de investigación.

En este ambiente comienza a trabajar Luis Norberto, completando la tesis doctoral en 1993. Desde entonces, sus objetivos se han centrado en la búsqueda de desarrollos científico-técnicos avanzados, la transferencia de resultados al tejido industrial y utilizar la investigación como un medio para la mejora de la formación de los alumnos de diferentes niveles. En 2007 obtuvo la cátedra en la UPV-EHU, en Bilbao, puesto que sigue desempeñando hoy.

Desde el principio ha destacado por su capacidad para aglutinar y coordinar grupos de trabajo para el desarrollo de proyectos de I+D. Su grupo ha colaborado con numerosas empresas y centros tecnológicos nacionales e internacionales a través de numerosos proyectos. Ha sido responsable de un buen número de proyectos regionales y nacionales con financiación pública, y otros con empresas líderes en el sector de la fabricación. También es destacable su participación en 6 proyectos europeos y la participación en otros varios, con la participación de investigadores de muy diversos países. Todo ello le ha permitido constituir un grupo de investigación y alcanzar la masa crítica suficiente para conseguir importantes logros en el campo de la fabricación avanzada. Actualmente, el grupo está formado por alrededor de 12 investigadores doctores pero que llegan a 50 en el centro de fabricación avanzada aeronáutica que dirige.

Como nos ha explicado hace un momento, Luis Norberto y su grupo han trabajado con brillantes resultados en múltiples áreas de las tecnologías de fabricación. Entre ellas cabe destacar, por su repercusión internacional y en el entorno empresarial, el uso de tecnologías frontera para la fabricación de materiales de baja maquinabilidad, la respuesta dinámica de las máquinas herramienta durante el mecanizado, y en general lo referido a cómo aumentar productividad y calidad de productos de elevado valor añadido. En este sentido, cabe mencionar propuestas avanzadas sobre nuevos procesos de fabricación, como es el uso de taladrinas a alta presión en mecanizado, el bruñido de moldes y ejes para aumento de su vida, la reducción de vibraciones en mecanizado de componentes ligeros, el fresado en 5 ejes de rótores integrales para turbina, o el uso del CO₂ como gas criogénico en el mecanizado en sustitución de las contaminantes taladrinas. Los trabajos desarrollados en esta última línea han sido la principal razón para la concesión del premio Juan López de Peñalver de nuestra Academia a los miembros jóvenes del grupo. Ese espíritu de abrir tecnologías rompedoras también está presente en líneas como la de biomecanizado, que busca emplear extremófilos para el micromecanizado en cobre, u otras líneas como la fabricación aditiva metálica, o la aplicación

de la Inteligencia artificial para la mejora de las condiciones de fabricación. Estos trabajos se han plasmado en ocho patentes, varias de ellas con licencia internacional.

Resultado de su fructífera actividad investigadora en estos años son los más de 200 artículos internacionales publicados, con más de 15000 citas, 2000 el último año, y un IH de 77 (o 59 en WoS), que es el más alto de España en su campo y le sitúa en la lista de Stanford del 2% de autores más citados. Ha dirigido 38 tesis doctorales en el campo de la fabricación, ha publicado varios libros y es editor o miembro del *editorial board* de varias revistas internacionales. Varias de estas tesis son de investigadores de los centros tecnológicos y de ingenieros que trabajan en empresas, prueba de cómo se puede realizar esta función universitaria de una forma muy abierta.

Toda esta actividad le ha permitido, además de conseguir los logros antes mencionados, establecer una red de contactos y colaboraciones nacionales e internacionales, y la captación de fondos, no solo para la realización de los proyectos, sino también para abordar nuevos retos de cara al futuro. Pero, además, ha conseguido algo que es muy importante, como es la confianza del sector nacional de la máquina herramienta y de varias empresas dedicadas a la fabricación para abordar nuevos proyectos conjuntos.

López de Lacalle se ha referido a las máquinas herramienta y a las personas que impulsan este sector, que se ha definido clave tanto para el País Vasco como para España. Actualmente, la actividad industrial representa un 23 % del PIB vasco, frente al 18% que representa en el conjunto del país, siendo la primera comunidad en inversión en I+D respecto al PIB, con un 2,1% del mismo y una participación de las empresas del orden del 60%. En concreto, en relación a la Máquina herramienta, cabe destacar que España es actualmente el tercer exportador europeo de máquinas herramienta, siendo la facturación del País Vasco el 80% del total nacional, facturación que representa el 2,6% de las exportaciones de la comunidad.

Otra apuesta de la política económica vasca ha sido el desarrollo del sector aeroespacial, con el fomento de las empresas del sector y la creación del clúster aeroespacial, cuyas empresas generan un 1,2% del PIB vasco y el 5,6 % del PIB industrial. La vinculación de López de la Calle con el sector aeroespacial le ha permitido combinar las necesidades de fabricación avanzada de este sector con el de la máquina herramienta. Con su empuje y perseverancia, avalado por el prestigio alcanzado con sus logros anteriores, ha sido capaz ayudar a coordinar a las diferentes administraciones

con el sector empresarial, convirtiéndose en un impulsor de la creación del Centro de Fabricación Avanzada Aeronáutica, del que es su director desde su creación en 2016. Dicho centro está concebido como centro mixto de la Universidad del País Vasco y la Agrupación Empresarial para el Desarrollo de Técnicas de Fabricación Aeronáutica Avanzada, con el apoyo y colaboración del Gobierno Vasco y la Diputación Foral de Vizcaya

El Centro surge con el objetivo de poder desarrollar tecnologías avanzadas de fabricación en niveles de desarrollo que sean de rápida transferencia (TRL 5-7) al tejido industrial, sin olvidar la generación, uso y puesta a punto de nuevo conocimiento en tecnologías avanzadas de fabricación. Además, sirve de lugar de encuentro y trabajo conjunto de diferentes agentes y empresas que poseen capacidades, intereses y trayectorias convergentes en el sector de los componentes aeronáuticos.

El CFAA ha contado con 9 millones de inversión inicial, con unos 1,7 millones anuales de gastos corrientes. Las empresas participantes, que inicialmente eran 11 y ahora son más de 100, contribuyen cada año con un millón de euros aproximadamente, presupuesto al que debe añadirse la financiación obtenida de proyectos de I+D competitivos. En total trabajan o se forman en el centro más de 50 tecnólogos entre contratados para los proyectos, alumnos en formación y doctorado, algunos doctores provenientes del extranjero. El número de proyectos TRL 5 a 7 desarrollados desde su inicio supera los 500, generalmente actividades de proyectos de mayor envergadura que engloban a varios socios industriales.

Las tecnologías empleadas son las más avanzadas en fabricación, incluidas las nuevas ideas de fabricación aditiva en metal y tecnologías asociadas a la industria 4.0. Un aspecto importante del Centro es su modelo en sí mismo, al ser compartido entre empresas y Universidad, pero dentro del NIF de la universidad. Esto lo convierte en un nuevo concepto y con posibilidad de ser ejemplo en otros campos de la ingeniería. Este nuevo modelo habría sido imposible sin voluntad y perseverancia, creatividad en los planteamientos y empatía para entender a todos los intereses involucrados. Como suele ocurrir, las buenas ideas son una parte del éxito pero en este caso concurrieron también la voluntad, tenacidad y amplitud de miras de muchos ingenieros y directivos de las empresas involucradas, especialmente ITP Aero, Danobat Group, Ibarmia, Ona electroerosión, Renishaw y demás socios fundadores. Como ya se ha repetido, las personas son las grandes impulsoras de los grandes proyectos.

No debemos olvidar la faceta docente de Luis Norberto. Aparte de las labores docentes desarrolladas durante todos estos años en grado y más-

ter, cabe destacar su actividad como promotor, y director de 2007 a 2017 del Aula de Máquina Herramienta en la Escuela de Ingeniería de Bilbao, con un presupuesto de unos 2,8 millones en estos 10 años. Allí se han formado más de 300 alumnos/as de nivel Master que se han trasferido directamente a empresas o han realizado posteriormente el doctorado. El aula puede considerarse una parte importante de un ecosistema de innovación en su campo. Igualmente, en 2021 creó el Aula AIMS (artificial intelligent manufacturing for sustainability), junto a Ideko, BCAM e IMH campus, que trata de promover trabajos de digitalización en el campo de la fabricación. Esta iniciativa cuenta con un presupuesto anual de 150.000 euros, que sitúa a la UPV/EHU y sus socios en la esfera de la estrategia nacional en este campo.

No quiero terminar sin mencionar la extensión internacional de su labor docente e investigadora, con colegas y discípulos trabajando en puestos clave en centros y empresas de muy diversos países, como USA, México, Alemania. También hay que mencionar la actividad de divulgación de la Ingeniería, con más de trescientos trabajos en revistas profesionales del ramo.

Sin duda de lo que más presume López de Lacalle es del talento de los miembros de su grupo de trabajo, ya hoy día verdaderos líderes en campos como fabricación aditiva, metrología y otras tecnologías y que actúan de forma autónoma. Sin duda este desarrollo del grupo en su totalidad es un buen mérito a destacar.

En definitiva, puede decirse que Luis Norberto López de Lacalle es un ingeniero comprometido con el desarrollo tecnológico de España, con una trayectoria en la que ha compaginado intereses universitarios con los de servicio a las empresas y a la sociedad española, y que ha generado un grupo reconocido internacionalmente en procesos avanzados de fabricación y máquina herramienta. Con su incorporación a la RAI, este sector, de gran importancia para el desarrollo industrial de España, tendrá la presencia que merece en la Academia, al mismo tiempo que la institución se enriquecerá con sus valiosas aportaciones.

Estoy seguro, Luis Norberto, de que tu actividad en la Academia será muy fructífera, que participarás activamente en sus iniciativas e incrementarás el prestigio de la Academia. Por todo ello, no me queda más que darte la bienvenida.

Muchas gracias.



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA, INNOVACIÓN
Y UNIVERSIDADES