

# Eje de accionamiento de alta velocidad con husillo a bolas

Thorsten Frank y Erich Lunz

Separata de la revista "antriebstechnik"  
Cuaderno nº1, enero 1998  
Editorial Vereinigte Fachverlage



# Eje de accionamiento de alta velocidad con husillo a bolas

Ingenieros diplomados Thorsten Frank y Erich Lunz

**El presente artículo muestra, con ayuda de la concepción y del desarrollo de un “Eje de accionamiento de alta velocidad con husillo a bolas”, los potenciales de los accionamientos innovadores para ejes de máquinas-herramienta basados en tecnología acreditada. La realización se basa aquí en un husillo firmemente fijado por sus extremos, y una tuerca roscada de bolas, accionada. Además de los aspectos constructivos, se presentarán las propiedades de funcionamiento conseguidas en el ensayo.**

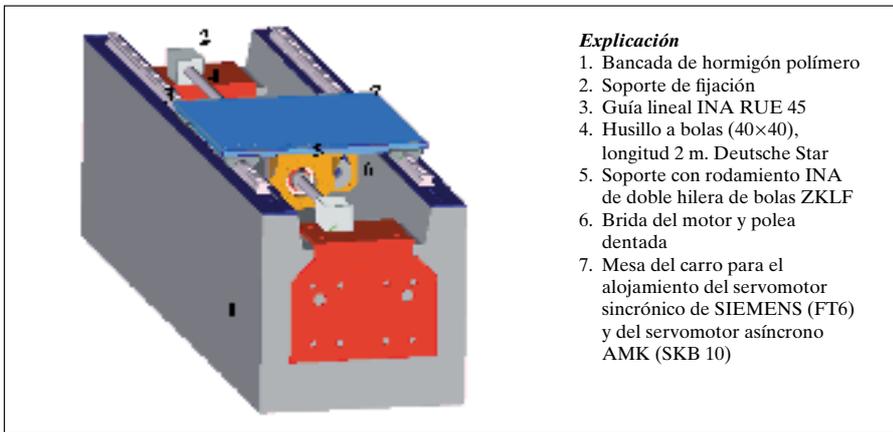
## 1. Introducción

La construcción de máquinas en Alemania está marcada en los últimos años por la fuerte competencia internacional [1]. Para el área de las modernas máquinas-herramienta con CNC esto significa que las empresas se enfrentan al reto permanente de mejorar la productividad y la calidad de mecanizado de sus máquinas. Junto a la reducción de costes en el proceso de fabricación se exigen, además, nuevos conceptos de máquinas que integren nuevas funciones de manipulación y de coordinación de forma flexible y económica.

El aumento simultáneo de la velocidad y de la calidad del mecanizado crea elevadas exigencias al comportamiento dinámico y térmico de los sistemas de avance de las máquinas modernas. Los grandes progresos en el área de la técnica de regulación, como también en el desarrollo de motores dinámicos de accionamiento, apoyan esta tendencia [2]. En cambio, los componentes mecánicos representan hoy día, frecuentemente, el elemento más débil de la cadena de accionamiento con el objetivo de un aumento de la dinámica. Los límites de la concepción clásica de un eje CNC montado de forma fijo-libre se sitúan actualmente en el margen de velocidades de 30 a 60 m/min, con una capacidad de aceleración de hasta 10 m/s<sup>2</sup> [3].

El accionamiento lineal ofrece nuevas posibilidades para superar estos límites técnicos, prometiendo un claro aumento de la velocidad, gracias a sus propiedades especiales. Su principio de acción se basa en convertir la energía eléctrica directamente en un movimiento de traslación, sin elementos mecánicos de transmisión en el flujo de fuerzas. Con los accionamientos de la investigación se consiguieron, en ensayos, aceleraciones que corresponden a entre 10 y 12 veces la aceleración terrestre y se alcanzaron velocidades del orden de más de 100 m/min [4].

Estas ventajas generales tienen su contrapartida en una rigidez dinámica reducida, en comparación con sistemas de avance electromecánicos, en una fuerte influencia térmica en la estructura de la máquina, en la sensibilidad respecto a variaciones de los parámetros de carga y, en particular, unos costes del sistema claramente mayores, que hacen que el accionamiento lineal no parezca ser la solución ideal para todas las aplicaciones [3, 5]. Esto ha conducido a que uno de los campos principales de aplicación sea el arranque ligero de viruta. No es posible la fabricación de piezas grandes y pesadas, con grandes fuerzas de mecanizado.



**Explicación**

1. Bancada de hormigón polímero
2. Soporte de fijación
3. Guía lineal INA RUE 45
4. Husillo a bolas (40×40), longitud 2 m. Deutsche Star
5. Soporte con rodamiento INA de doble hilera de bolas ZKLF
6. Brida del motor y polea dentada
7. Mesa del carro para el alojamiento del servomotor sincrónico de SIEMENS (FT6) y del servomotor asíncrono AMK (SKB 10)

Figura 1 Vista de conjunto del soporte de ensayo, Instituto para máquinas-herramienta y técnica operacional (wbk), Escuela Técnica Superior de la Universidad de Karlsruhe

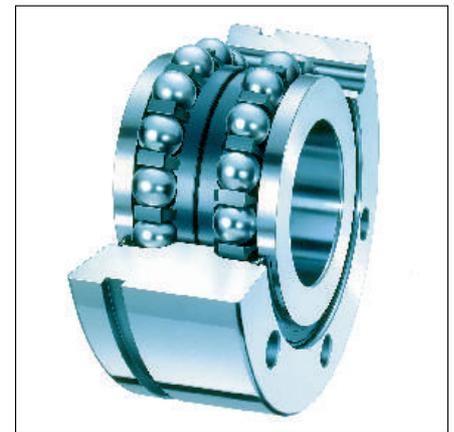


Figura 3 Un componente importante del soporte de ensayo es el rodamiento de dos hileras de bolas de contacto angular ZKLF de INA

Ante este panorama, surgió la tentación de desarrollar un sistema competitivo, en cuanto a la dinámica, que se basara en una tecnología de avance acreditada. En el marco de un proyecto conjunto fomentado por el estado de Baden-Württemberg, en colaboración con prestigiosos fabricantes de máquinas-herramienta y de componentes, se llevaron a cabo en el Instituto para máquinas-herramienta y técnica operacional (wbk), de la Escuela Técnica Superior de la Universidad de Karlsruhe, la concepción y la realización de una cinemática de avance innovadora, basada en un husillo firmemente fijado por sus extremos y en una tuerca accionada.

## 2. Estructura del soporte de ensayo del “Eje de accionamiento de alta velocidad” con tuerca accionada

En ejes de avance electromecánicos, el movimiento giratorio del servomotor se convierte, con ayuda de un husillo a bolas, en un movimiento lineal del carro. La concepción clásica de un eje CNC comprende aquí un husillo de avance accionado y una tuerca de husillo rígidamente unida al carro.

Una variante de este concepto del eje es el “Eje de avance altamente dinámico con husillo a bolas”. Aquí, el husillo se sujeta firmemente entre dos caballetes de fijación y es la tuerca la que es accionada por un servomotor (figura 1).

En el marco de los ensayos se estudian dos variantes de accionamiento. En la figura 2, a la izquierda, se utiliza un servomotor estándar, que acciona la tuerca a través de una correa dentada. La figura 2, a la derecha, muestra el accionamiento directo de la tuerca con servomotor de eje hueco. Los dos motores, altamente dinámicos y de última generación, proporcionan para la

aceleración del carro, aproximadamente 100 Nm y alcanzan velocidades de hasta 4000/min<sup>-1</sup>. Además, la masa del carro puede ser aumentada gradualmente hasta media tonelada. Se utilizan dispositivos digitales de control con sistema de medida lineal para el control de la posición.

Para alcanzar una elevada dinámica del sistema, en el diseño de todo el conjunto de accionamiento giratorio se ha tenido en cuenta una minimización consecuente de los momentos de inercia, gracias a una estructura delgada (figura 2). Esto ha sido posible mediante el rodamiento de dos hileras de bolas, de contacto angular, ZKLF de la empresa INA (figura 3) [7]. Mediante este rodamiento se consigue una unión rígida de la tuerca con el carro.

Para que sean comparables las dos variantes de accionamiento, en el motor de eje hueco se ha integrado un rodamiento igual. El momento de inercia total resultante del prototipo con 2 metros de longitud de husillo es, a pesar de la masa del servomotor a mover, idéntico al de un husillo accionado de la misma longitud. Para husillos más largos, la inercia es aún más favorable.

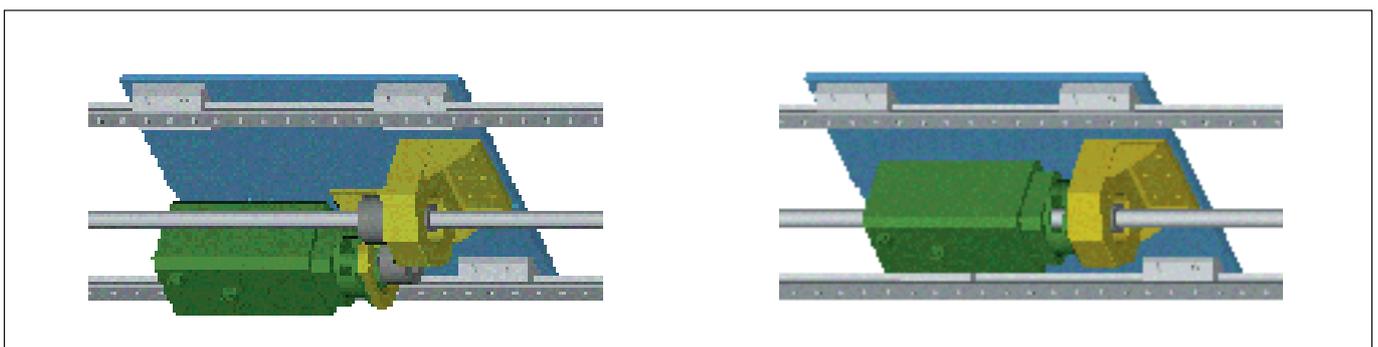


Figura 2 Variantes de accionamientos: servomotor estándar con correa dentada y accionamiento directo con servomotor de eje hueco

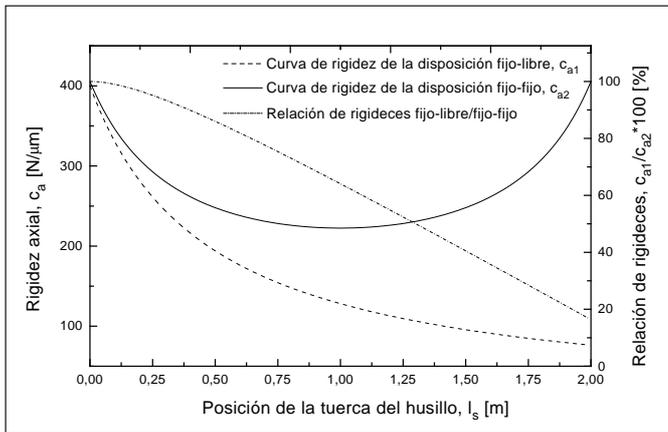


Figura 4 Relaciones de rigideces para fijaciones del husillo fijo-libre y fija en los dos extremos, a través de la posición del eje, con una longitud de husillo de 2 m

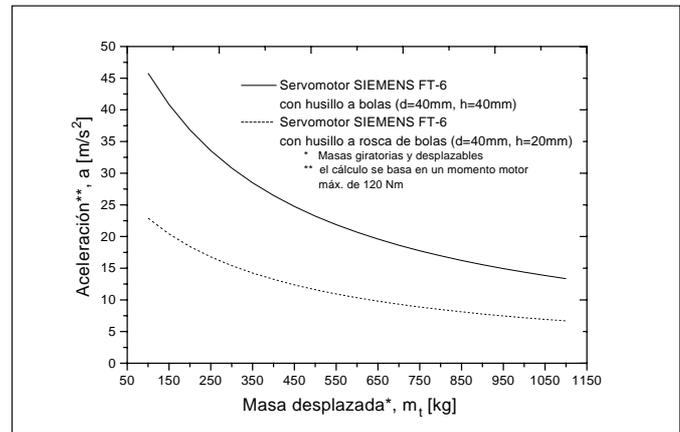


Figura 5 Capacidad de aceleración calculada del eje de accionamiento de alta velocidad, con el momento máximo

### 3. Aumento de productividad gracias a la nueva cinemática

Las propiedades especiales de la nueva cinemática de avance se ajustan muy bien a las elevadas potencias de los motores. Gracias al husillo fijado por sus extremos, el sistema global tiene una rigidez axial que está muy por encima de la del husillo montado de forma fijo-libre. La figura 4 muestra la correlación de las relaciones de rigidez axial a través de la posición de la tuerca del husillo. La menor rigidez axial no está en el lado del apoyo libre, como en el eje de avance convencional, sino en el centro de la zona de desplazamiento, con lo cual se minimiza la variación de la rigidez a lo largo de la longitud de desplazamiento.

Respecto a la velocidad máxima de marcha rápida, el accionamiento de la tuerca resulta ser una ventaja directa, porque se evitan los problemas del número de revoluciones crítico en cuanto a la flexión del husillo. Los análisis de frecuencia realizados en el soporte de ensayo han dado como resultado una frecuencia axial propia del sistema de accionamiento de más de 120 Hz. Incluso cuando hay elevados números de revoluciones de entrada, el sistema se mueve siempre por debajo de los valores críticos.

La limitación de las velocidades de marcha rápida está restringida, por lo tanto, sólo a la velocidad máxima de rodadura de los accionamientos por husillo. Con los accionamientos utilizados en el marco de los ensayos, con un diámetro de 40 mm y un paso de 40 mm, se ha podido alcanzar una velocidad de 120 m/min con el número máximo de revoluciones posible de 3000 min<sup>-1</sup>. Los valores de aceleración conseguidos con un peso de mesa de 100 kg alcanzaron 30 m/s<sup>2</sup>, sin haber intentado alcanzar el límite teórico de 45 m/s<sup>2</sup>, en favor de la duración de vida del accionamiento (Figura 5).

El aumento de la productividad conlleva una clara intensificación de la carga térmica en una máquina-herramienta, puesto que la energía introducida se convierte casi en su totalidad en calor [8, 9]. Debido al constante aumento del número de revoluciones o de la velocidad, se produce un aumento continuo de la temperatura en el sistema de accionamiento.

Las curvas de medición representadas en la figura 5 describen el estado de equilibrio de temperatura de los ejes de avance para las velocidades de marcha rápida entre 40 y 100 m/min. Los mayores valores de temperatura se alcanzan en la zona de la tuerca del husillo a bolas. En la zona del rodamiento de apoyo de INA, del motor y de los carriles-guía, se alcanzan valores de temperatura claramente menores. Los valores para el accionamiento directo y el accionamiento indirecto son iguales. Debido a un aumento de la masa del carro hasta un máximo de 600 kg, los valores de temperatura aumentan hasta en un 10 %.

La figura 6 muestra, además, la influencia del número de revoluciones en la dilatación del husillo. La dilatación longitudinal del husillo, que aparece a causa del calentamiento, provoca, a temperaturas elevadas, un enorme incremento de la longitud del husillo. La compensación de esta dilatación mediante estirado previo del husillo requiere fuerzas de aprox. 60–100 kN, por lo que no es realizable.

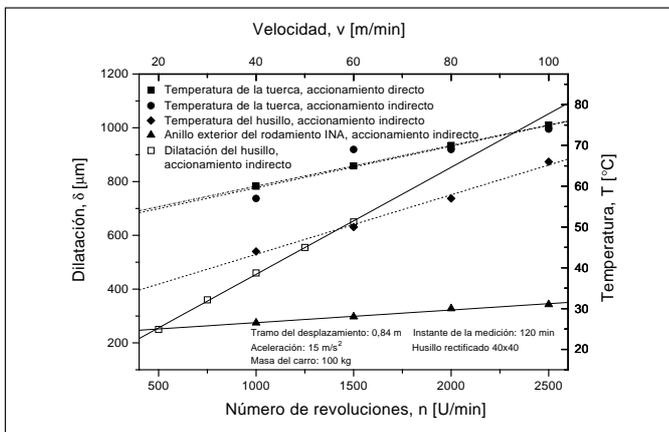


Figura 6 Curvas de temperatura y de dilatación en puntos característicos del eje de avance con una masa de carro  $m_1 = 100$  kg

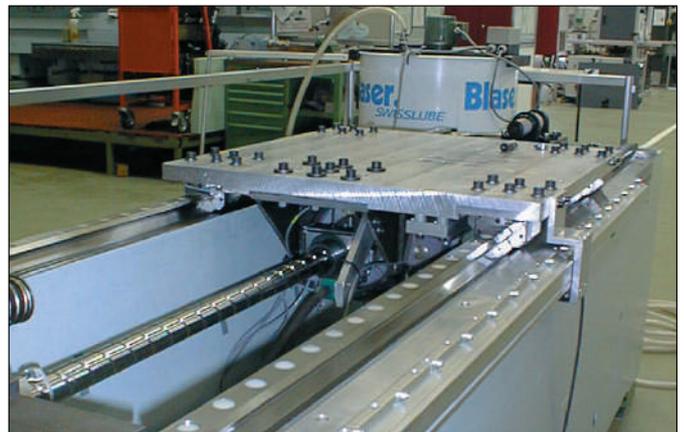


Figura 7 Estudio del comportamiento dinámico de accionamientos directos

Para unas condiciones de funcionamiento constantes del husillo a bolas, se necesita un dispositivo de precarga variable, que compense las dilataciones térmicas del husillo mediante la apertura breve de un sencillo dispositivo del soporte de fijación, sin reducir la rigidez del soporte del husillo.

Otra posibilidad, para el caso del husillo fijado de forma rígida, consiste en el uso de un husillo taladrado para que esté hueco, que es enfriado desde el interior con un medio refrigerante. La modificación de la rigidez a la torsión es prácticamente despreciable. La influencia de la masa no equilibrada debida al husillo parado, no está comprobada. El circuito de refrigeración del husillo puede estar integrado en el circuito de refrigerante de la máquina. De estudios a largo plazo [10] resultó una reducción de la diferencia de temperaturas del husillo de 32 K a 4 K.

### 3.1 Exactitud de posicionado a través de estudios de la dinámica del accionamiento

Además de conseguir elevadas aceleraciones y velocidades de marcha rápida, otro aspecto importante del desarrollo es un comportamiento optimizado de la cinemática de avance, con una regulación de la posición (Figura 7).

Para la transmisión del movimiento requerido, es necesario que el eje de movimiento siga las magnitudes de posición prescritas, con el mínimo de distorsiones posible. Sin embargo, esta exigencia sólo se puede realizar de forma aproximada en el sistema real. La causa de ello es la dinámica propia de la regulación de la posición, con sus elementos de conversión de energía y sus componentes mecánicos. Por ello, el objetivo es un comportamiento del sistema que permita introducir elevados momentos de aceleración en la cinemática de avance, sin generar una estimulación relevante de las vibraciones mecánicas. Esta propiedad es requisito previo para que, a velocidades elevadas de avance, se pueda conseguir siempre una fidelidad suficiente al recorrido [11, 12].

Para determinar el comportamiento de transmisión, se registró la respuesta gradual del elemento de regulación del número de revoluciones, con ayuda de

un sensor de aceleración en el carro. La masa del carro puede ser aumentada gradualmente hasta 600 kg. La figura 8 (página 6 arriba) muestra la respuesta del sistema global a una interferencia generada por un salto de valor teórico de 0 a 10 m/min. El tipo de interferencia corresponde, p.ej. a las fuerzas en el fresado o torneado, en zonas de corte interrumpidas.

Los tiempos de decrecimiento del accionamiento directo se sitúan en, aprox. 80 m/s, en un margen considerable para máquinas-herramienta. El aumento de la masa de la mesa de 100 a 600 kg. no provoca ninguna prolongación del tiempo. El accionamiento indirecto alcanza tiempos de decrecimiento aún más cortos.

Este excelente comportamiento dinámico del sistema se explica por el hecho de que los momentos de la tuerca accionada transmitidos al husillo, están amortiguados en los dos extremos. La fijación del husillo por sus extremos reduce, por lo tanto, la tendencia a la torsión del mismo. La elevada rigidez axial del sistema permite una conversión más directa del momento rotatorio del motor en aceleración axial, sin una acumulación excesiva de energía en forma de un husillo torsionado. Además, hay que tener en cuenta la buena amortiguación, que tiene sus valores máximos en, aprox. 0,04 en la zona central del recorrido de desplazamiento en el husillo.

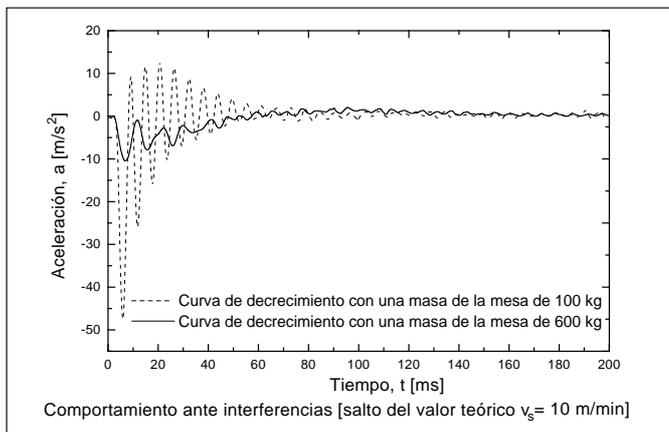


Figura 8 Respuesta gradual del accionamiento directo

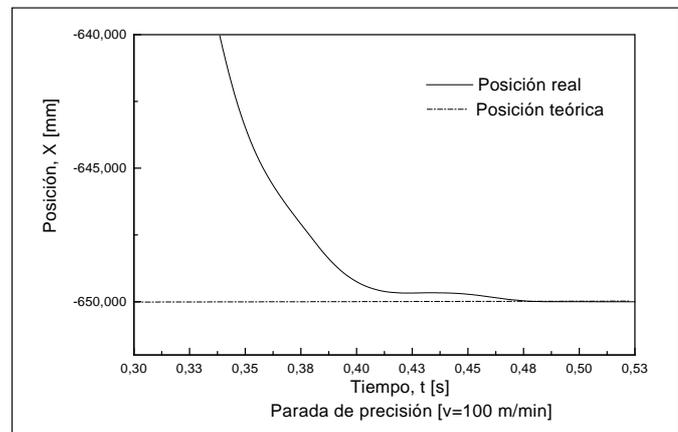


Figura 9 Comportamiento de posicionado con  $a$  (NC) = 15 m/s<sup>2</sup>,  $K_v$  = 4000/min, masa de la mesa de 410 kg y un recorrido de desplazamiento de 400 mm

Para un proceso concreto de posicionado, este hecho significa una reducción esencial de la duración del desplazamiento, sin compromisos en cuanto a la exactitud. La figura 9 lo muestra mediante un salto de posición, con precisión, en un recorrido de desplazamiento de 400 mm y a una velocidad de 100 m/min.

Estas propiedades son favorecidas, además, por las frecuencias propias claramente mayores del sistema global, en comparación con los ejes convencionales. El accionamiento directo muestra con su única frecuencia de 170 Hz su claro comportamiento como vibrador de una masa. Con el husillo precargado, la rigidez dinámica axial prácticamente no depende de la posición de desplazamiento del carro. El comportamiento como vibrador de una masa significa una buena regulabilidad del eje, que puede ser incluso claramente mejorada mediante una adaptación de la regulación. El accionamiento indirecto tiene, además de su elevada frecuencia propia de husillo axial, de 130 Hz, otras frecuencias propias de orden inferior, que deben ser asignadas a la correa dentada. Mediante variación de la precarga de la correa dentada o de la rigidez de la cadena del vibrador, se puede influir positivamente en esta frecuencia propia.

En los estudios dinámicos de los accionamientos se ha podido demostrar que el nuevo eje de movimiento CNC tiene un comportamiento dinámico considerablemente mejor gracias a la disposición rígida. Esto no solamente es así cuando se trata de pequeñas masas del carro, sino, sobre todo, en presencia de elevadas masas del carro, una de las debilidades esenciales del motor lineal.

## 4. Mayores velocidades gracias a una modificación de la técnica de los rodamientos

### 4.1 Alojamiento de la tuerca del husillo de avance

La mayor dinámica de todo el ramal de accionamiento condiciona, naturalmente, también un desarrollo de los diferentes componentes afectados. Una revisión del alojamiento de la tuerca del husillo a bolas con un rodamiento precargado de dos hileras de bolas, de contacto angular, ha permitido un claro aumento de prestaciones de estos acreditados rodamientos. Sobre todo se han producido modificaciones en los componentes del rodamiento, permitiendo un número de revoluciones más elevado. Mediante la moderna tecnología de fabricación se ha podido mejorar la ejecución de las pistas de rodadura. Con lubricantes cuya composición se fundamenta especialmente en los colectivos de carga aquí existentes, se han podido conseguir grandes progresos.

Extensas pruebas en INA han confirmado este progreso también en la práctica, de modo que en la EMO 1997 se pudo ofrecer al mercado, sin influir de ninguna manera en los costes, un rodamiento de las mismas medidas, que permite un número de revoluciones un 30% mayor (figura 10). Si bien el alojamiento hasta ahora utilizado cumplía con los requisitos del soporte de ensayo y de las pruebas realizadas en el mismo, se sabía que se había llegado al límite superior del espectro de potencia. La velocidad de marcha rápida de 120 m/min y el paso de 40 mm del husillo a bolas, requieren un número de revoluciones del rodamiento de 3000 min<sup>-1</sup>.

Este número de revoluciones, para el rodamiento ZKLF 60145.2Z, utilizado hasta ahora en el soporte de ensayo,

se encontraba fuera de las indicaciones del catálogo, que indica como velocidad límite  $n_G$  para grasa, 2400 min<sup>-1</sup>. Así, se demuestra que con el nuevo rodamiento modificado, este límite del número de revoluciones puede ser fijado en 3000 min<sup>-1</sup>. Si antes con una velocidad de 120 m/min se excedía el límite de revoluciones admisible, actualmente, con el nuevo rodamiento, se está por debajo de los valores límite admisibles.

### 4.2 Rodamiento híbrido

En este rodamiento ya se han utilizado las bolas de cerámica. En los diversos ensayos de INA, un rodamiento híbrido, con anillos de acero y elementos rodantes cerámicos, mostró grandes aumentos del número de revoluciones. Se han alcanzado, casi sin problemas, velocidades de rotación de 6500 min<sup>-1</sup>. El coeficiente de dilatación térmica más reducido, de 2,9  $\mu\text{m}/\text{m}/\text{K}$ , de las bolas cerámicas tiene aquí un efecto positivo. Cuando los anillos de acero es decir, el anillo interior y el anillo exterior más grande, se dilatan en una medida determinada cuando aumenta el calentamiento, las bolas cerámicas dispuestas entre los anillos se dilatan menos que ellos. De esta forma, se reduce la precarga inicialmente aplicada al rodamiento, la presión específica sobre los elementos rodantes es menor y la potencia de rozamiento es más baja, de modo que, desde el punto de vista de la técnica de los rodamientos, se podría alcanzar una velocidad de 260 m/min con un paso de 40 mm del husillo a bolas.

Esto es, naturalmente, utópico; aunque sí se puede ver que no hay ningún impedimento para el siguiente paso en el eje de avance altamente dinámico con husillo a bolas y que se dispone, ya en la actualidad, de los componentes idóneos para la técnica de los rodamientos.

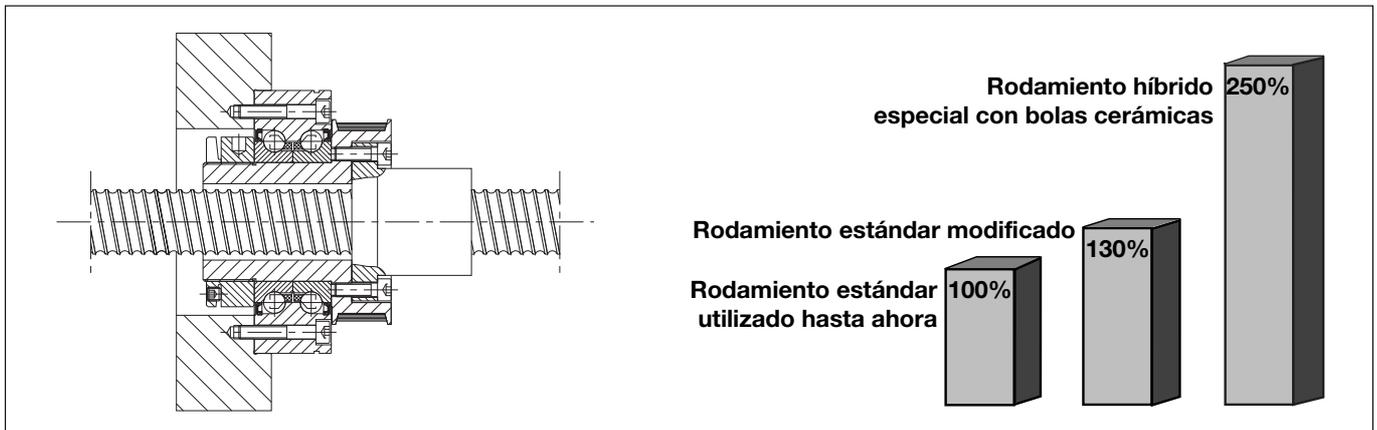


Figura 10 Rodadura de tuerca de husillo de avance, con rodamiento a bolas de contacto angular ZKLF, de doble efecto. Ejemplo de montaje según el principio del wbk. Aumento del número de revoluciones, mediante modificación de los rodamientos, a un 130%, y como rodamiento híbrido especial con bolas cerámicas, a un 250%.

## 5. Resumen y perspectivas

El sistema de avance concebido en el laboratorio (wbk) abre amplias perspectivas para el desarrollo de nuevas generaciones de máquinas altamente dinámicas, a base de la tecnología acreditada del husillo a bolas.

Con velocidades de marcha rápida de hasta 120 m/min y aceleraciones de hasta 30 m/s<sup>2</sup>, esta tecnología representa una alternativa equivalente al accionamiento lineal. Este notable comportamiento dinámico no está limitado, sin embargo, a pequeñas masas de carros sino que se aprecia, especialmente, cuando se trata de grandes masas de carros. Por ello, el montaje en construcciones ya existentes de máquinas se puede realizar con un esfuerzo relativamente pequeño.

El desarrollo actual del rodamiento de INA y, esto es quizá lo más importante, la conclusión sobre el desarrollo de husillo a bolas para sistemas de tuercas giratorias rápidas, promete un claro aumento del rendimiento de este principio de construcción, en el futuro.

## Bibliografía

- [1] Weule, H.: La importancia del desarrollo de productos para el emplazamiento industrial en Alemania. VDI Desarrollo, construcción, venta. Informe anual de 1997, Düsseldorf
- [2] Schmitt, Thomas: Modelo de los procesos de transmisión de calor en la estructura mecánica de sistemas de avance controlados por CNC; tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Darmstadt, 1995
- [3] Pritschow, G.; Fahrbach, C.; Scholich-Tessmann, W.: Accionamientos eléctricos directos, en la construcción de máquinas-herramienta. VDI-Z 137 (1995) N° 3/4, pág. 76-79
- [4] Rehsteiner, F.; Zirn, O.: Sistemas rápidos de accionamiento del avance en máquinas-herramienta, Taller y empresa 128 (1995), pág. 802-810, Editorial Hanser-Verlag
- [5] Hopper, E.: Motores lineales, sincrónicos y asíncronos. Técnica de propulsión 33 (1994) N° 6, pág. 26-29
- [6] Ebert, Jürgen: INA Wälzlager Schaeffler KG; Accionamientos de avance mejorados: El constructor; ASB/95; pág. 12-18 [INA-95]
- [7] INA Wälzlager Schaeffler KG; Rodamientos para accionamientos por husillo, Herzogenaurach, 1992 [INA-92]
- [8] Fischer, H.: Artículo sobre el estudio del comportamiento térmico de taladradoras y fresadoras; tesis doctoral. TU Berlín 1970.
- [9] Kersten, A.: Comportamiento geométrico de máquinas-herramienta bajo cargas térmica y estática; tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Aquisgrán 1983.
- [10] N.N.; Elementos de máquinas de precisión, Técnica del movimiento lineal; NSK Corporation, Pr. N° GK030390 PME
- [11] Zirn, O.; Weikert, S.; Rehsteiner F.: Design and Optimization of Fast Axis Feed Drives Using Nonlinear Stability Analysis. Annals of Chirp Vol. 45/1/1996; pág. 363-367
- [12] Pritschow, G.: Influencia del aumento de la velocidad en la desviación dinámica del recorrido, wt-Producción y gestión 86; 1996, pág. 337-341

## Datos respecto al autor:

El ing. dipl. Thorsten Frank es colaborador científico en el Instituto para máquinas-herramienta y técnica operacional (wbk) de la Universidad (Escuela Técnica Superior) de Karlsruhe.

Erich Lunz es técnico de aplicación en el departamento de gestión de filiales, para máquinas-herramienta, en la empresa INA Wälzlager Schaeffler oHG en Herzogenaurach



**INA Rodamientos, s.a.**

Polígono Pont Reixat  
08960 Sant Just Desvern – Barcelona  
Teléfono (93) 480 34 10  
Fax (93) 372 92 50