

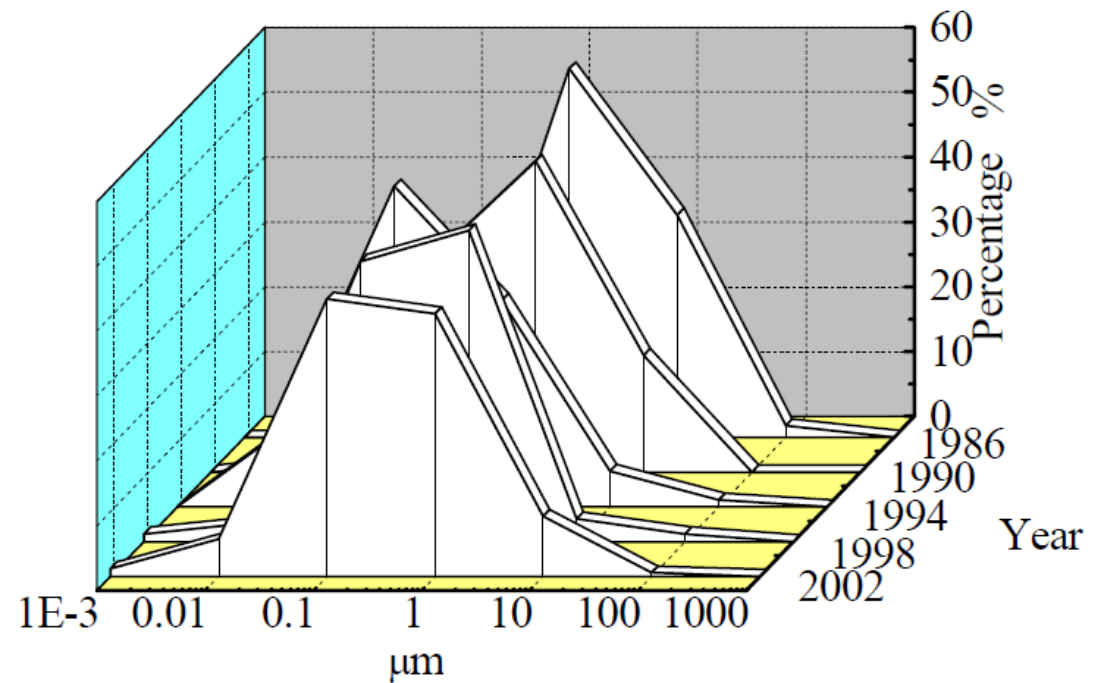
Desarrollo de Sistemas de Posicionamiento de Precisión

**Rogelio Hecker
UNLPam-CONICET**

**MetalExpo2015
FODAMI**

Tendencia de la precisión demandada

- Rango de precisiones de acuerdo a los requerimientos
 - Precisiones moderadas
 - Precisiones altas
 - Ultraprecisión



Sistemas de posicionamiento

- Sistemas a presentar
 - Sistemas de precisión y alta precisión
 - Sistema de tornillo y guías de bolas recirculantes con motor rotacional
 - Influencia de los parámetros del tornillo sobre el desempeño del control de la posición
 - Control combinado para compensar errores por dilatación térmica del tornillo
 - Sistema con motor lineal y guías de bolas recirculantes
 - Compensación de los errores inducidos por fricción en las guías
 - Sistema de Ultraprecisión
 - Flexure stage con actuador piezoeléctrico
 - Etapa de diseño

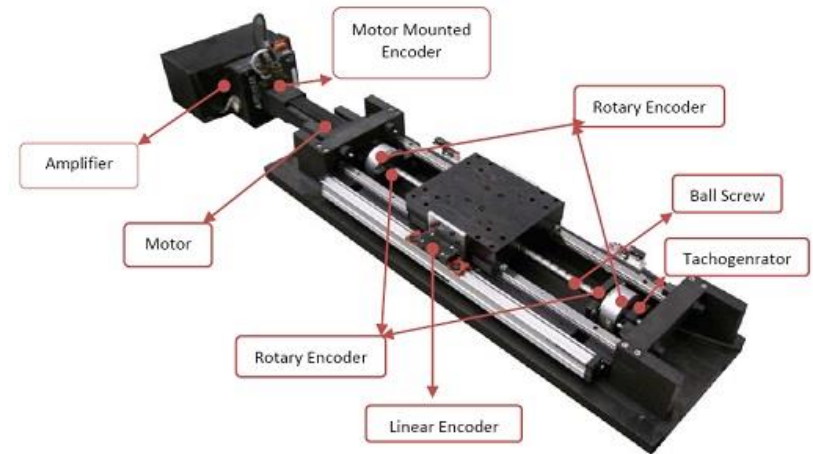
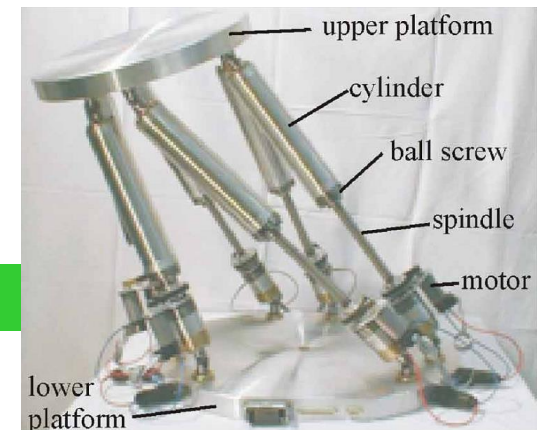
Tornillos de bolas recirculantes

- Características principales de los tornillos:
 - Alta precisión
 - Baja fricción
 - Juego mecánico minimizado
 - Alta capacidad de fuerza
 - Altas velocidades de rotación
 - Precarga para aumentar la rigidéz



Aplicaciones

- Sistemas de posicionamiento para
 - Máquinas herramienta CNC
 - Sistemas de posicionamiento para manufactura electrónica
 - Equipos de inspección
 - Metrología automatizada
 - Robots paralelos
 - Otros tipos precisos de posicionamientos



Dimensionado de estos sistemas

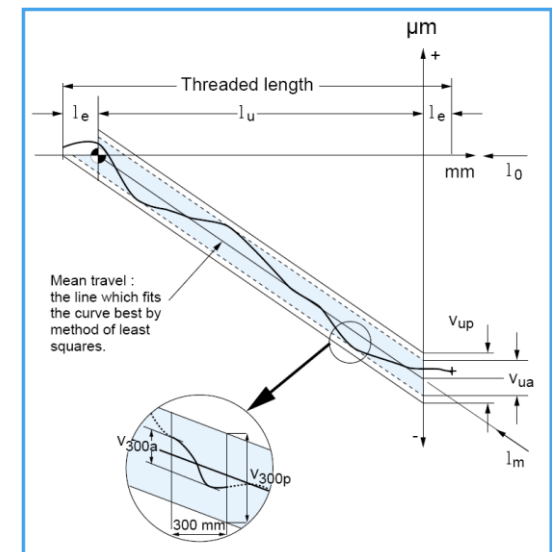
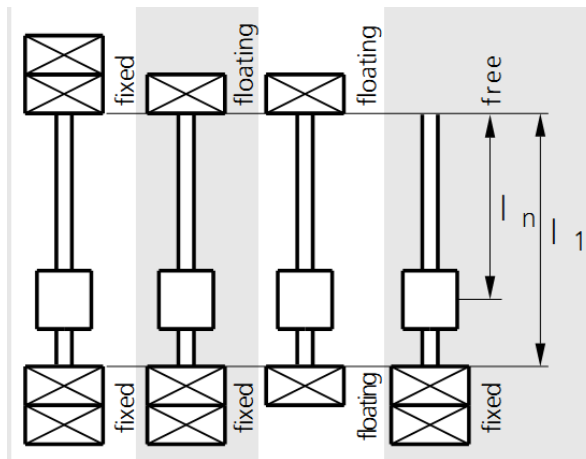
- Clásico
 - Identificar los requerimientos de la aplicación
 - Velocidades, aceleraciones, masas a mover, error deseado, etc.
 - Seleccionar el tornillo de bolas recirculantes basado en parámetros mecánicos
 - Fuerzas a desarrollar, velocidad máxima, juego mecánico, rigidez, grado de precisión, vida útil.
 - Seleccionar el motor y amplificador basado en especificaciones de los ciclos torque-velocidad y la relación de inercia con el tornillo
 - Seleccionar una estrategia de control y ajustar los parámetros de la misma para reducir el error y/o lograr un determinado ancho de banda

Diseño integrado

- Seleccionar el tornillo de bolas recirculantes basado no solamente en requerimientos mecánicos, sino también en su influencia sobre el lazo de control.
 - Identificar los parámetros principales del tornillo que afectan el desempeño del lazo de control
 - Sintonizar por simulación el controlador para diferentes tonillos candidatos
 - Elegir la solución “óptima”

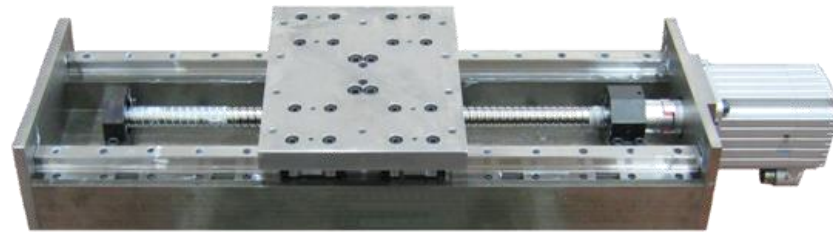
Ejemplo de especificaciones

- Seleccionar el tipo de tornillo
 - Laminado o rectificado. Ej clase T5 (23 μm de error en 300 mm)
 - Tipo de tuerca. Ej. tuerca simple, doble tuerca, etc
 - Precarga: rigidez vs fricción. Ej. del 5%
 - Tipo de configuración (Rigidez axial, velocidad crítica)

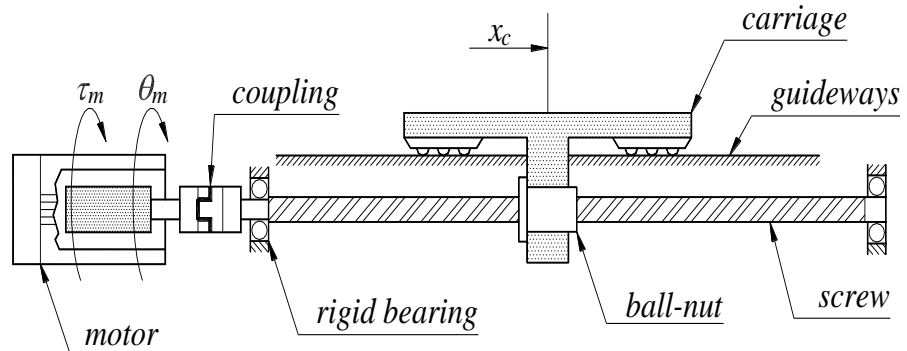


Sistema a estudiar

- Foto del sistema de la UNLPam



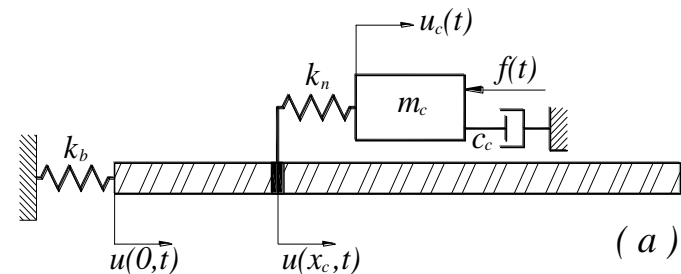
- Modelo esquemático de los principales componentes



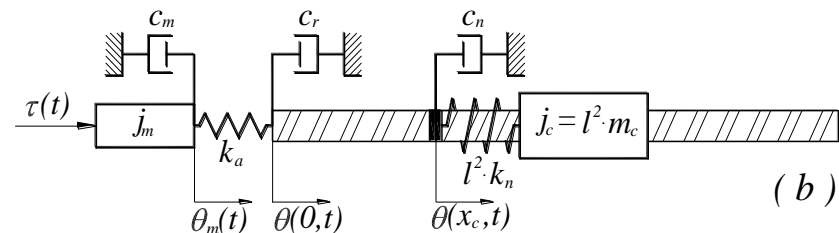
Modelo de la dinámica del sistema

- Modelado del sistema en dos componentes

- Axial



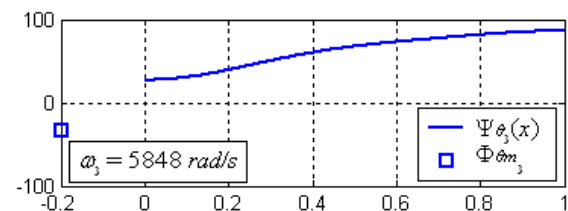
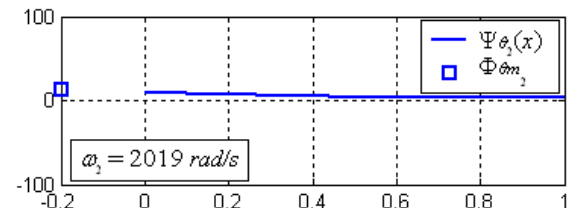
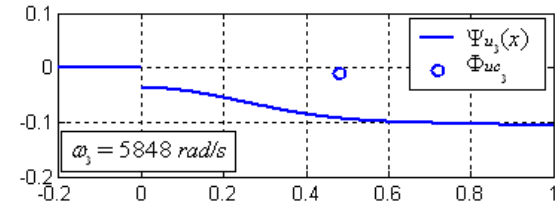
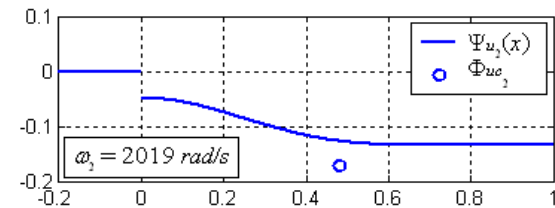
- Torsional



- Parámetros concentrados y parámetros distribuidos para el caso del tornillo
- Descripción matemática del modelo mediante formulación de Lagrange y series de Ritz para aproximar el campo de deformación del medio continuo

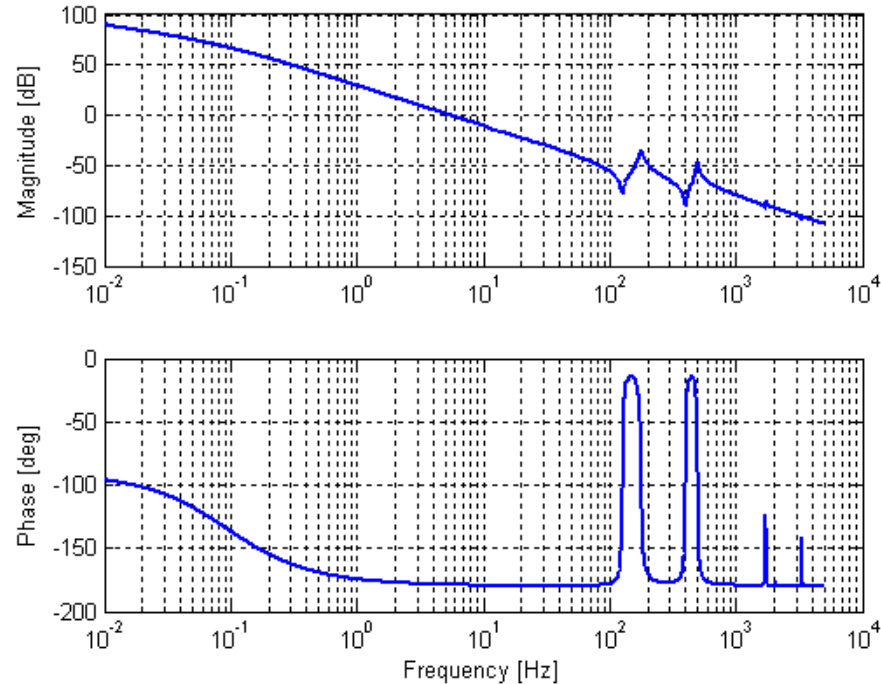
Resultados del modelo

- Predicción de los principales modos de vibración
 - Componente axial
 - Componente torsional

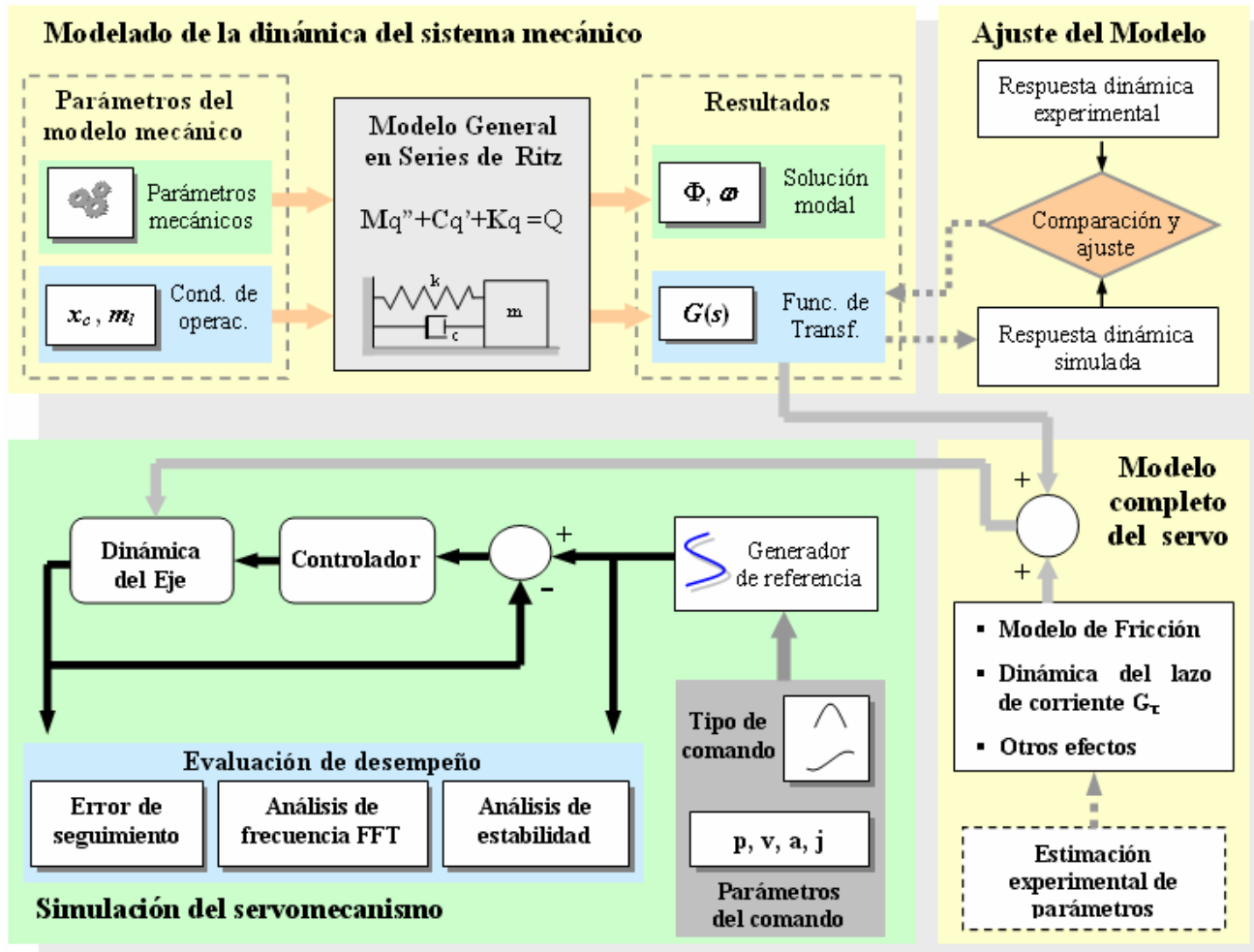


Resultados del modelo

- Respuesta en frecuencia a lazo abierto
 - Posición angular del motor vs. par motor
 - Aparece la dinámica de alta frecuencia

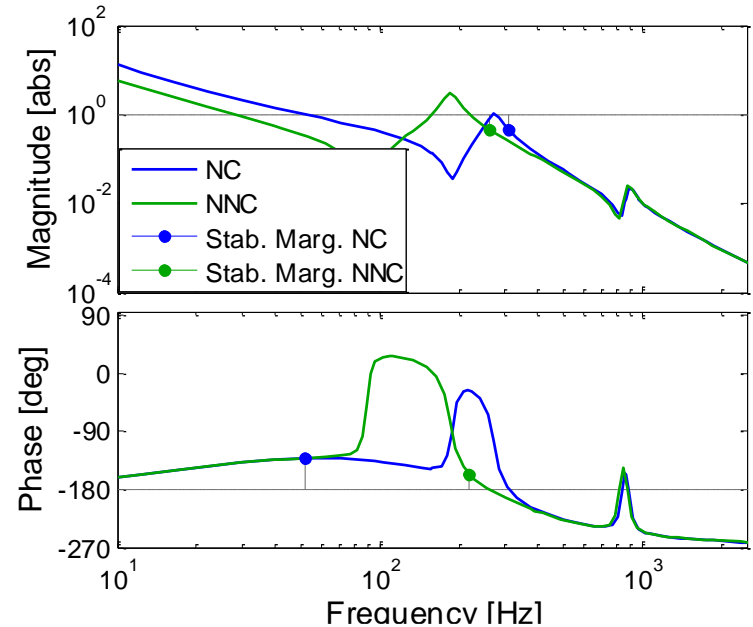
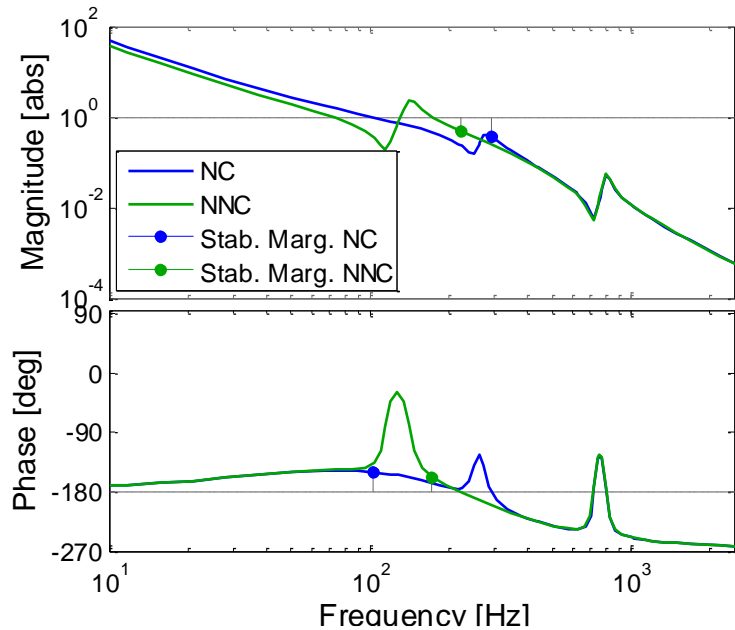


Ambiente de simulación



Comportamiento a lazo cerrado

- Controlador: variable de estado + ZPETC
- Para condiciones nominales (NC) y no nominales (NNC)
- Ejemplo de dos candidatos 20x10 y 25x25



Resultados de las simulaciones

- El controlador fue sintonizado en cada caso para obtener resultados similares para el caso de NNC

<i>Size</i>	<i>Parameter</i>	<i>NC</i>	<i>NNC</i>
25-10	PM	29.9°	22.6°
	GM	2.69	2.06
	CF	102.7	72.8
32-20	PM	40.4°	22.4°
	GM	2.98	2.08
	CF	74.13	46.7
25-25	PM	47.9°	22.4°
	GM	2.16	2.18
	CF	51.9	27.5

Error de seguimiento de trayectoria

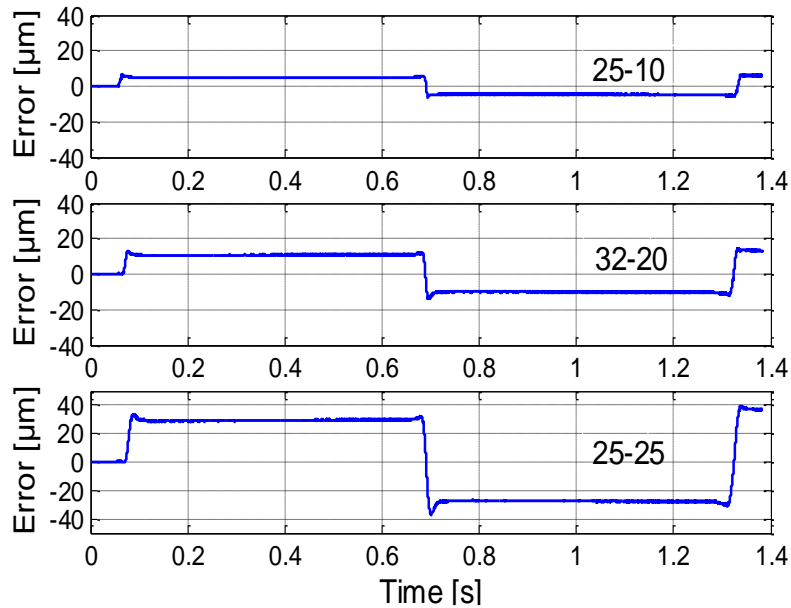


Fig. 4 Tracking error for NC

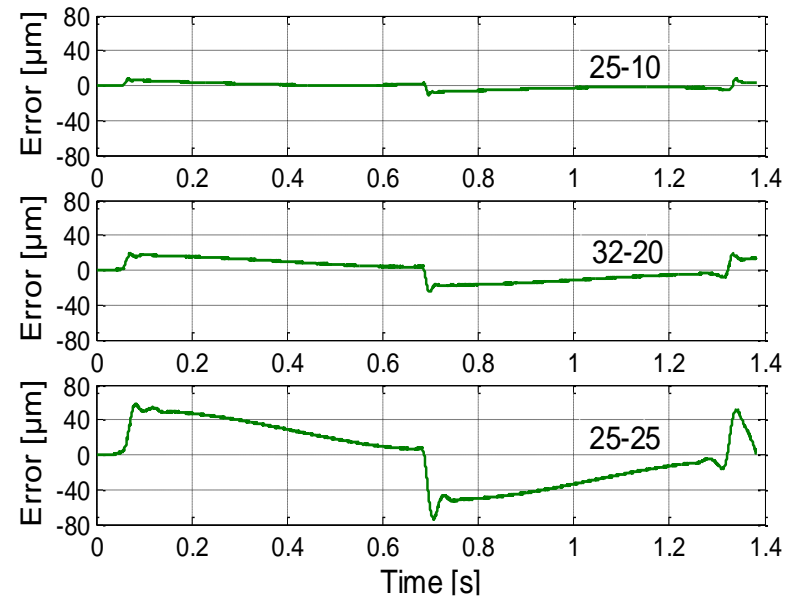


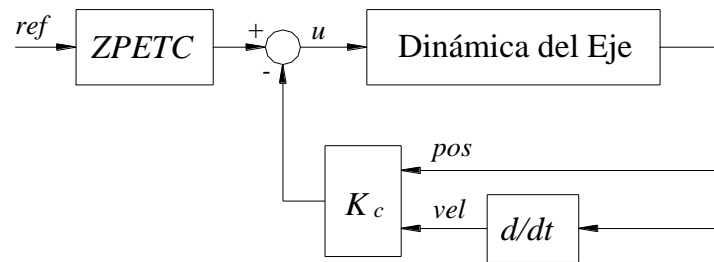
Fig. 5 Tracking error for NNC

Control colocado vs no colocado

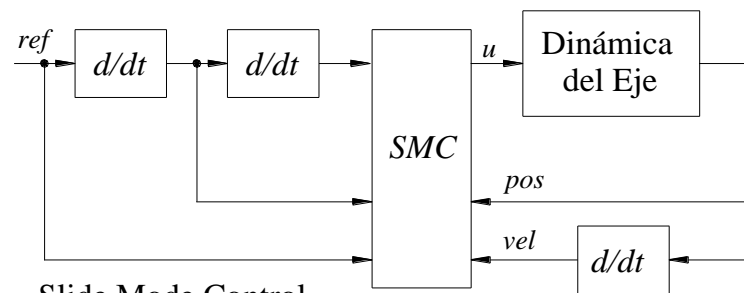
- Cuando la posición controlada es la del motor
 - La posición real de la mesa está influenciado por los errores del tornillo, deformaciones mecánicas y dilataciones térmicas
- Se puede utilizar control no colocado por ejemplo mediante una escala lineal
 - Se realimenta con la posición “verdadera” de la mesa pero el ancho de banda del lazo cerrado es generalmente menor
- Se propone una solución utilizando ambos controles

Estrategias de control

- Estrategias modernas de control
 - Control por variable de estado más ZPETC
 - Control por modos deslizantes



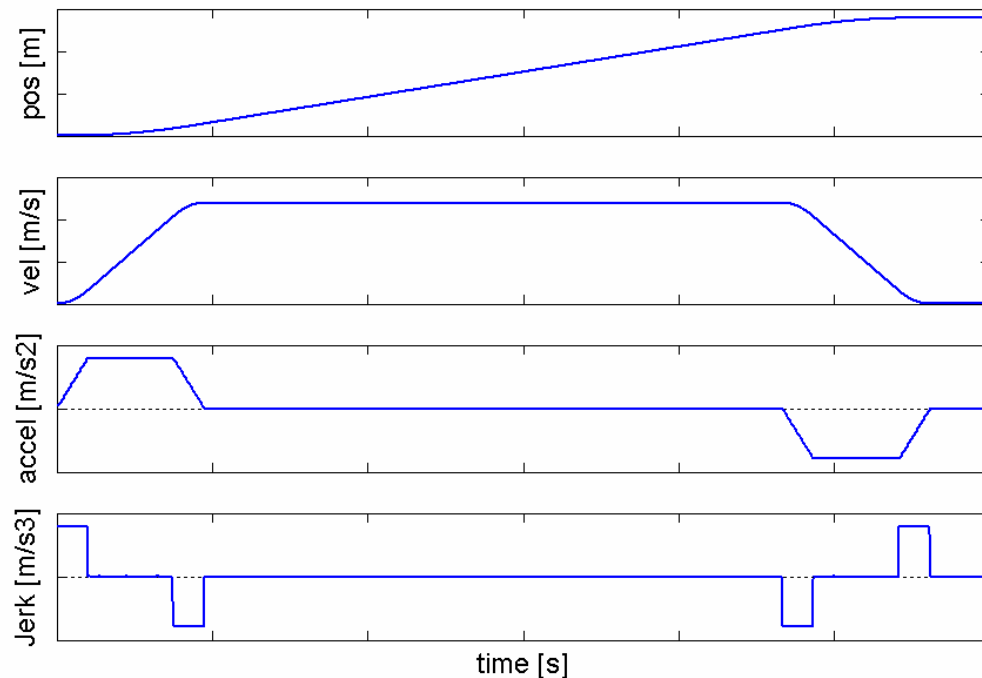
Pole Placement Controller + ZPETC



Slide Mode Control

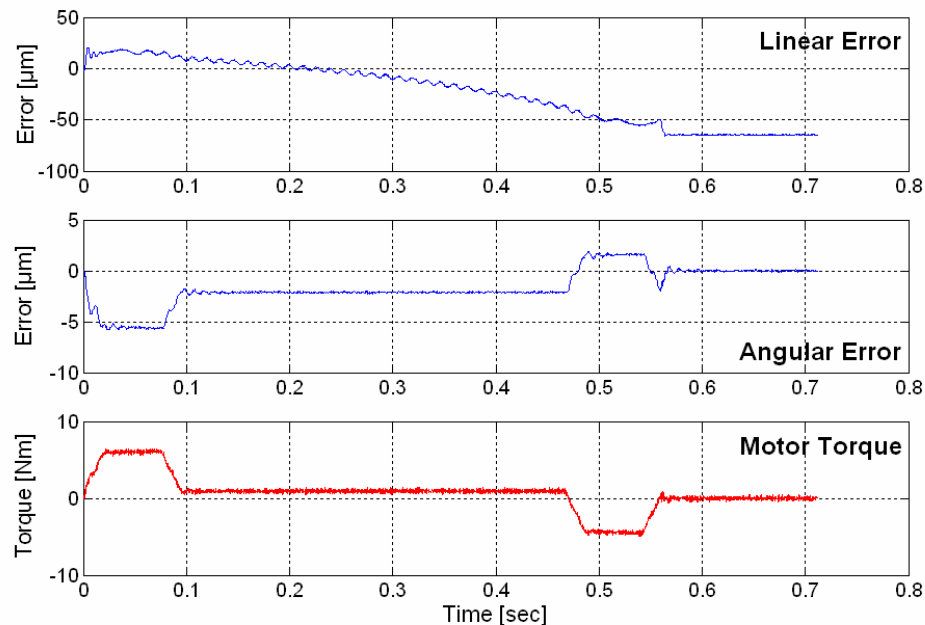
Tipo de trayectorias a estudiar

- Movimiento punto a punto, a velocidad constante, con perfil trapezoidal de aceleración y con límite del jerk



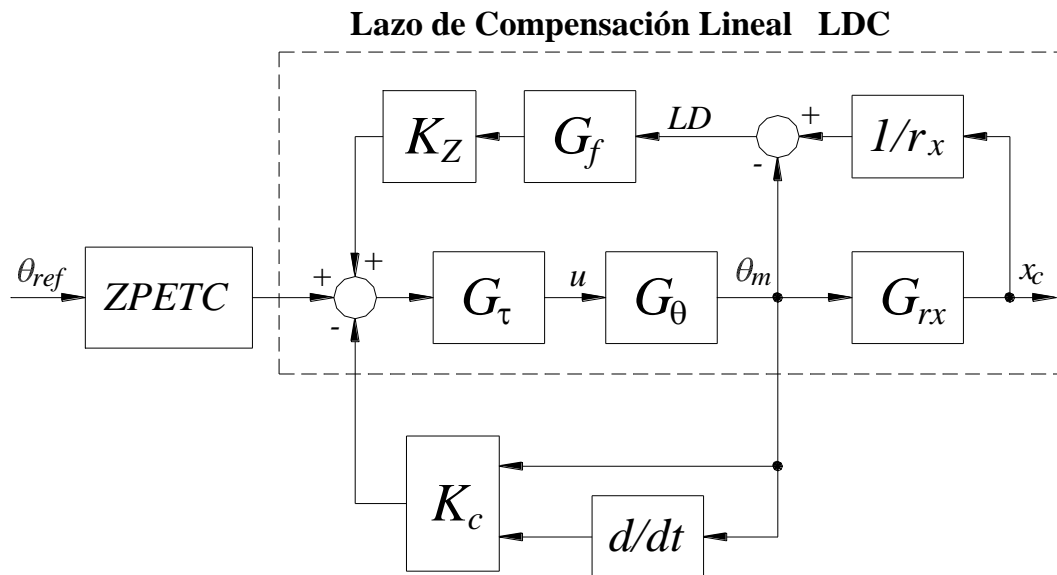
Control colocado

- Resultados de simulaciones:
 - Se controla la posición del motor medida un encoder rotacional
 - Se observa un error en la posición lineal debido a dilatación térmica del tornillo y a error de paso del mismo



Estrategia combinada

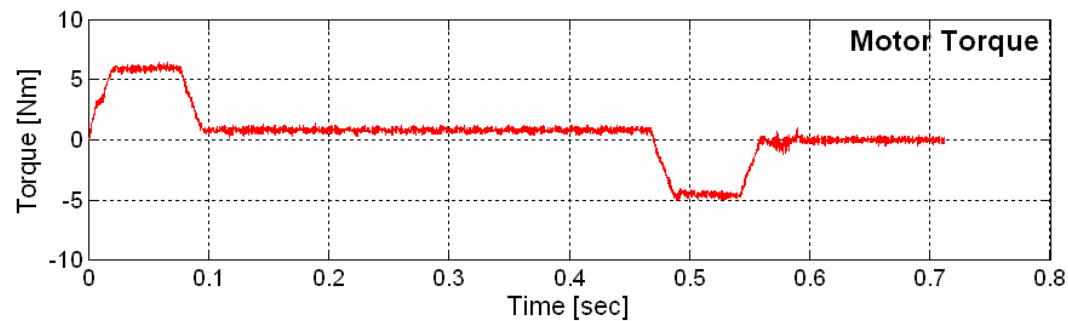
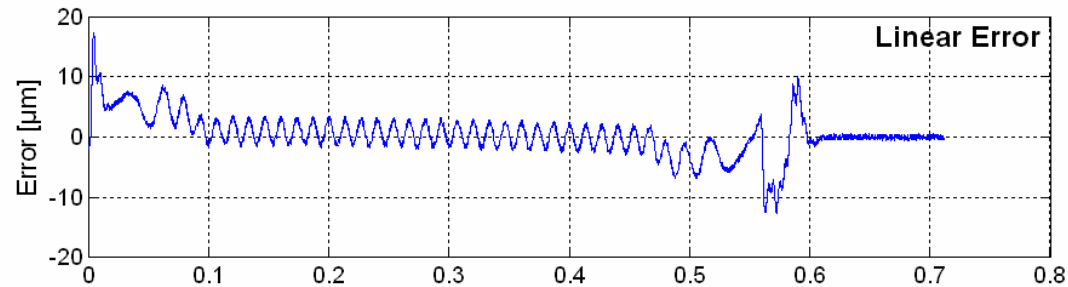
- Control colocado para lograr buen ancho de banda y por lo tanto errores reducidos
- Control no colocado con encoder lineal para compensar la dilatación térmica
- La sintonización final se realiza mediante un análisis de estabilidad



Estrategia combinada

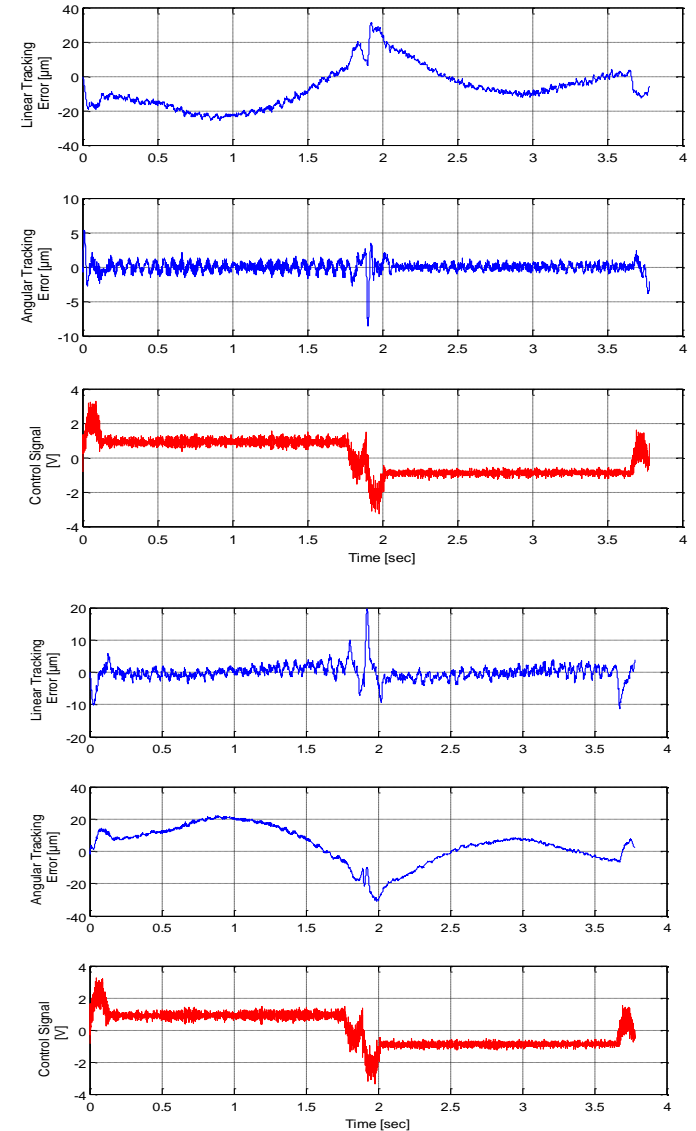
- Resultados

- Se observa ahora que en la posición lineal se pudo eliminar el error debido a deformaciones térmicas



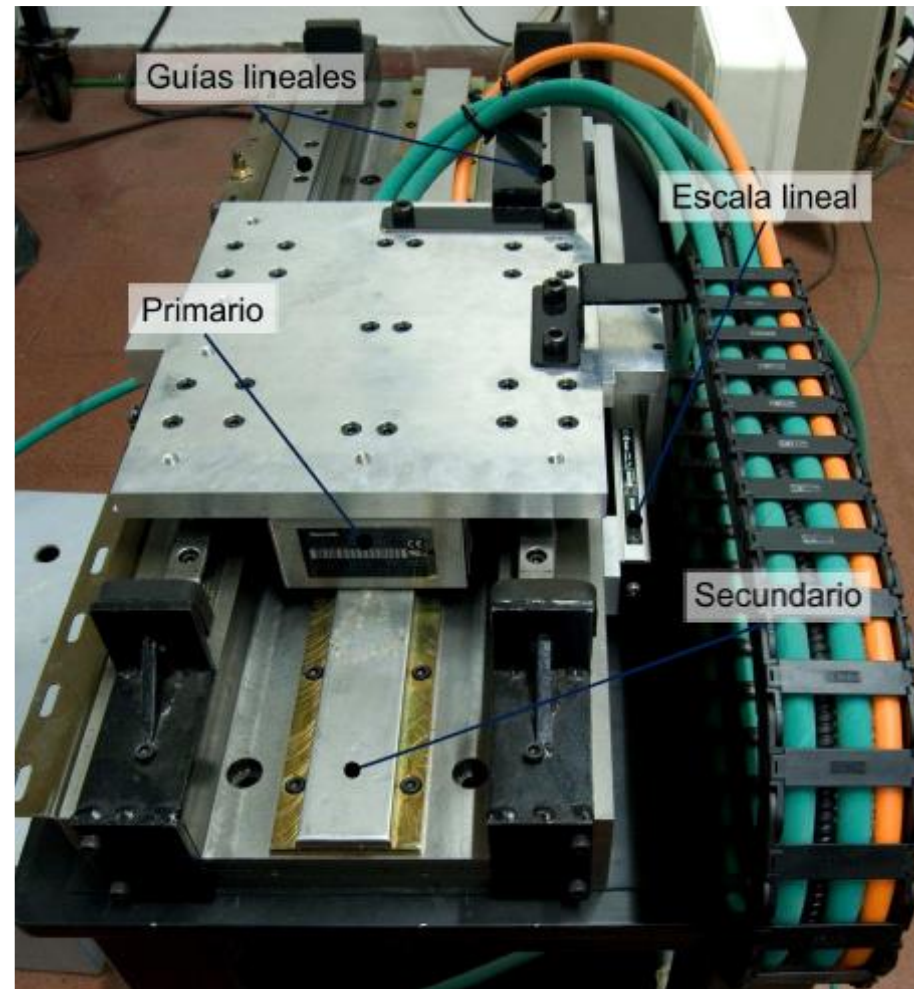
Estrategia combinada

- Datos experimentales
 - Control colocado
 - Estrategia combinada



Sistema en estudio

- Equipamiento
 - Motor lineal
 - Guías de bolas recirculantes
 - Escala lineal (100 *nm* de resolución)
- Propuesta
 - Lograr posicionamientos micrométricos
 - Aceleraciones y velocidades elevadas



Problema

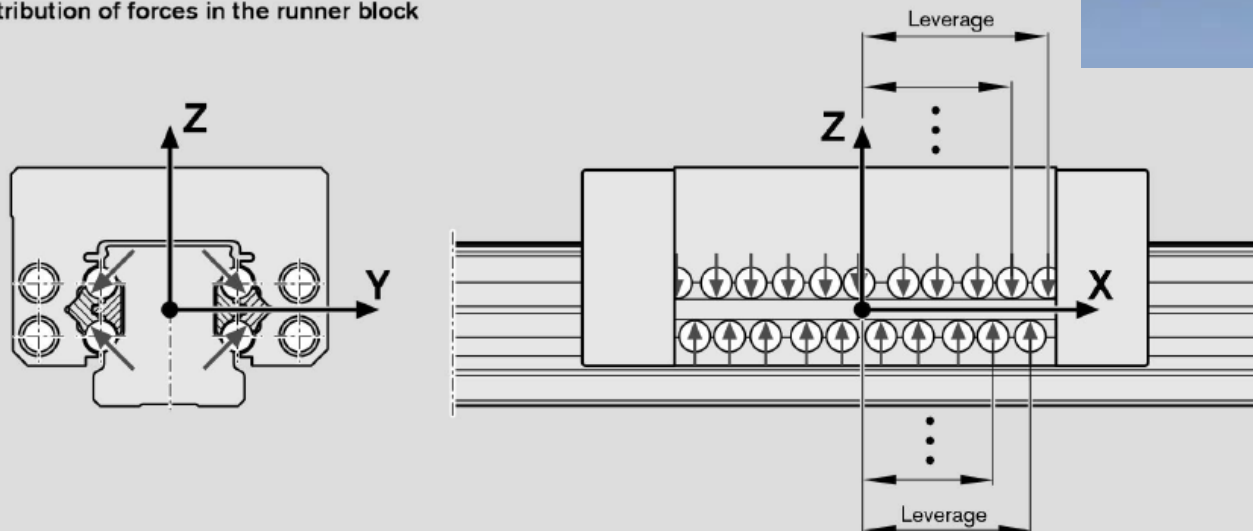
- Características del motor lineal
 - Alta velocidad de respuesta
 - Sin acoplamientos mecánicos por lo tanto sin modos de vibración
 - Muy sensible a perturbaciones externas
- Perturbaciones externas
 - Fuerzas externas (maquinado, etc.)
 - Fricción
 - Fenómeno complejo que degrada la precisión de posicionamientos

Guías lineales

- Características
 - Elementos rodantes
 - Sellos
 - Precarga

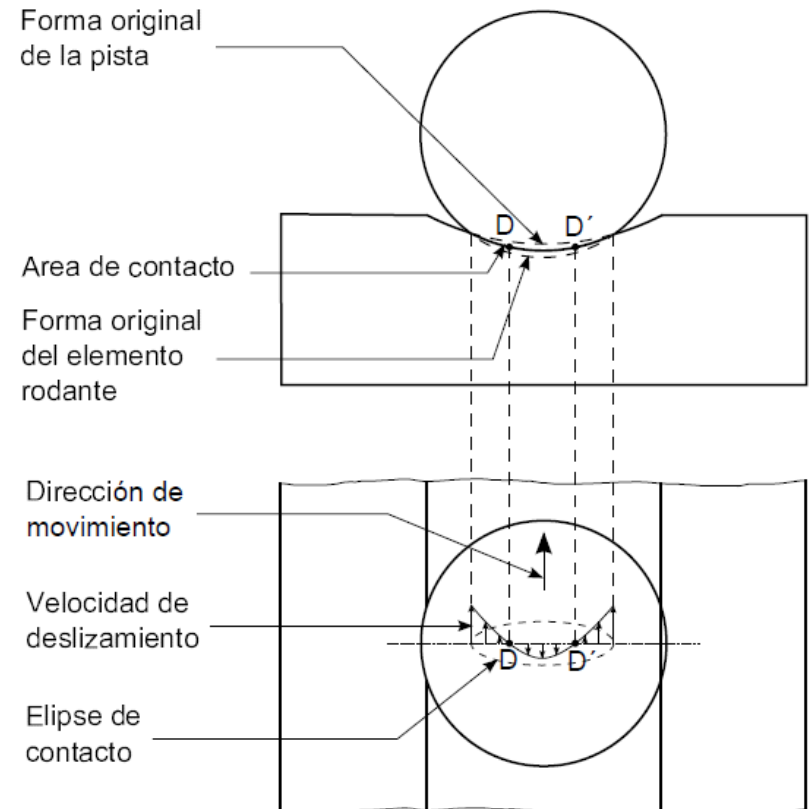


Distribution of forces in the runner block



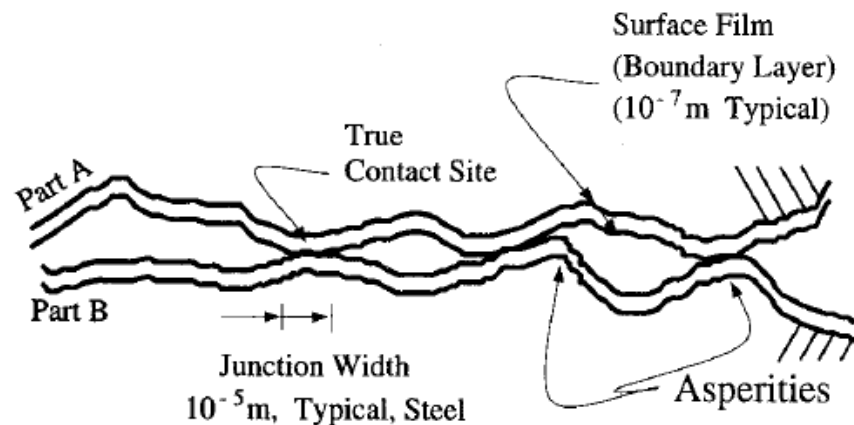
Efecto de la precarga

- Los elementos rodantes se deforman generando zonas de deslizamiento
- Los elementos rodantes deslizan respecto a las superficies de los canales y entre ellas (o separadores)



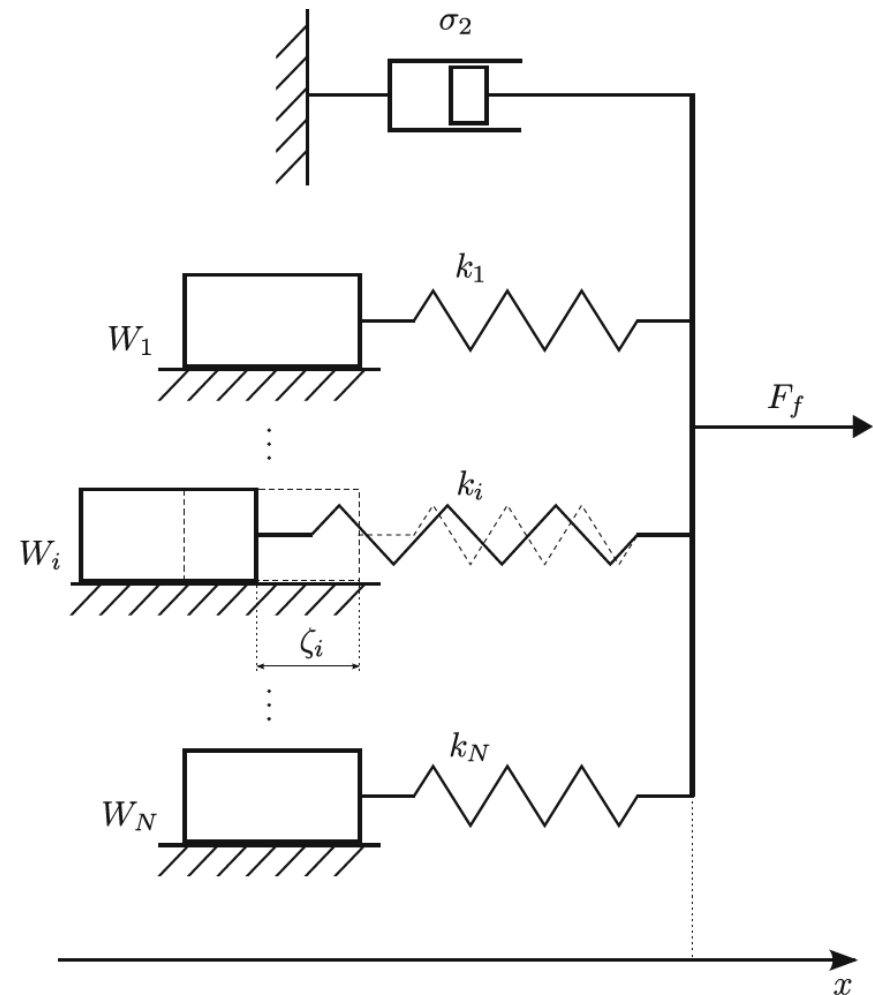
Característica de la fricción en guías

- Por lo tanto
 - Los elementos rodantes generan fuerza de fricción de superficies deslizantes lubricadas
 - Los sellos también generan fuerza de fricción de superficies deslizantes
- Fenómeno complejo dominado por las asperezas y la lubricación entre las superficies



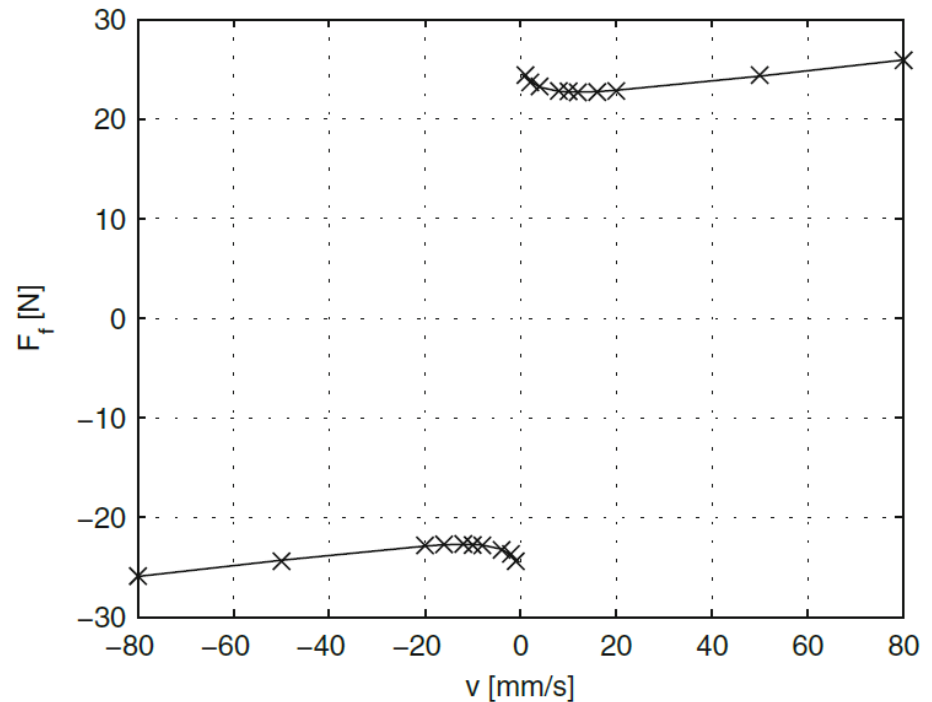
Generalized Maxwell-Slip model (GMS)

- Principio básico
 - Grupo de elementos que representan a las asperezas
 - Con ecuaciones de la dinámica para cada zona
 - Conmutación de la dinámica determinada por los estados de cada elemento



Curva de Stribeck (a velocidad constante)

- Experimentación



- Parametrización posible

$$F_f(v) = \text{sgn}(v) \left(F_c + (F_s - F_c) e^{-\left| \frac{v}{V_s} \right|^{\delta V_s}} \right) + \sigma_2 v$$

Ecuaciones del modelo GMS

- Fuerza total

$$F_f(t) = \sum_{i=1}^N F_i(t) + \sigma_2 v(t)$$

- Adherencia para cada elemento

$$\frac{dF_i}{dt} = k_i v$$

- Deslizamiento para cada elemento

$$\frac{dF_i}{dt} = \text{sgn}(v) v_i C \left(1 - \frac{F_i}{v_i S(v)} \right)$$

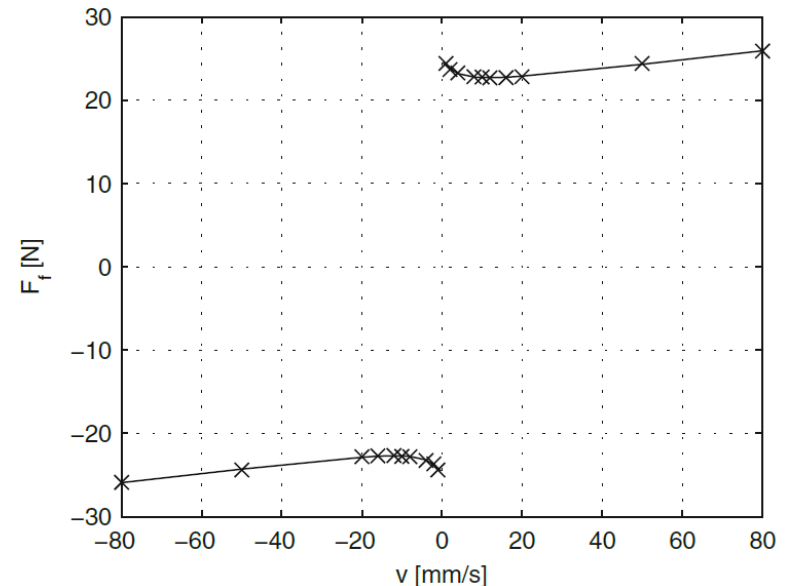
Deslizamiento

- Dinámica de la fuerza de deslizamiento por elemento incluyendo el “friction lag”

$$\frac{dF_i}{dt} = \text{sgn}(v) v_i C \left(1 - \frac{F_i}{v_i s(v)} \right)$$

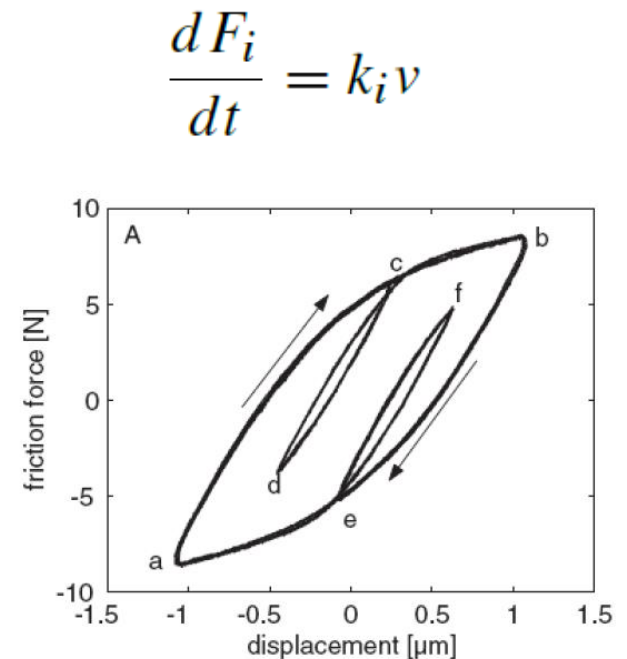
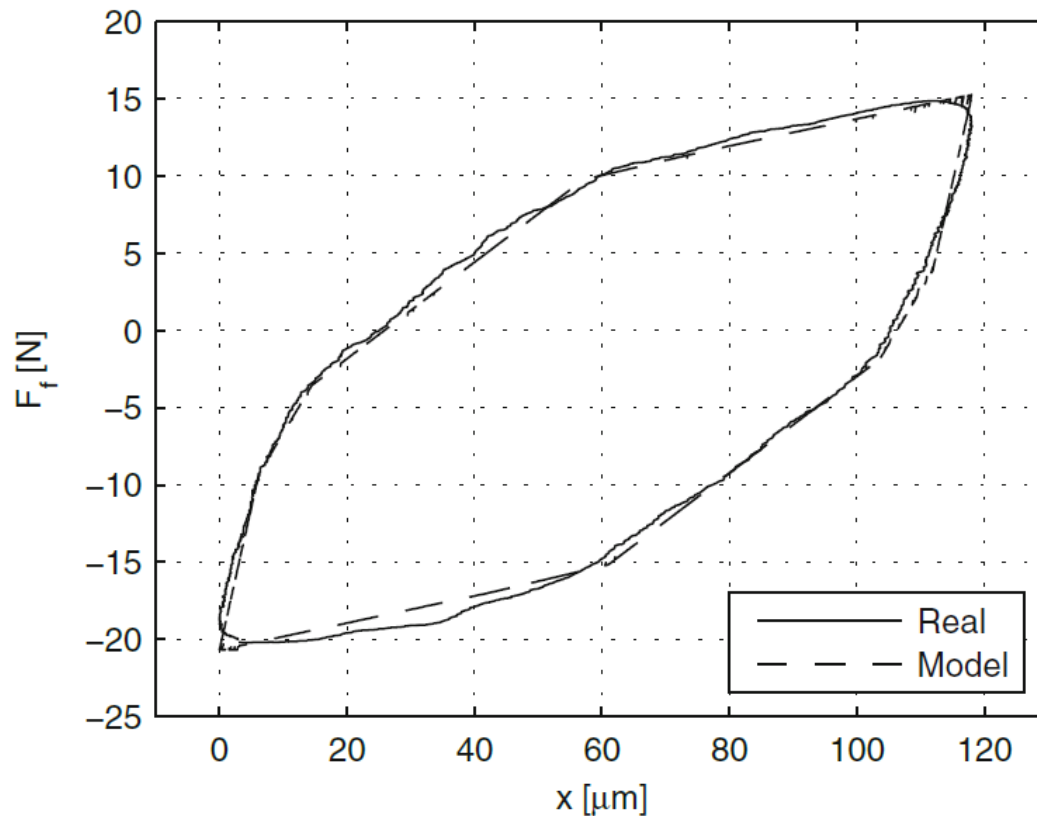
- Parámetro de atracción a la curva de Stribeck

$$C = 10.8 \text{N/s}$$



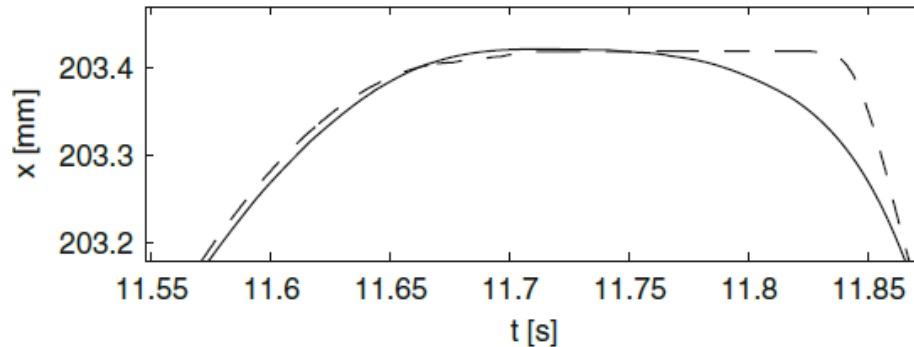
Predeslizamiento

- Curva de histéresis de predeslizamiento

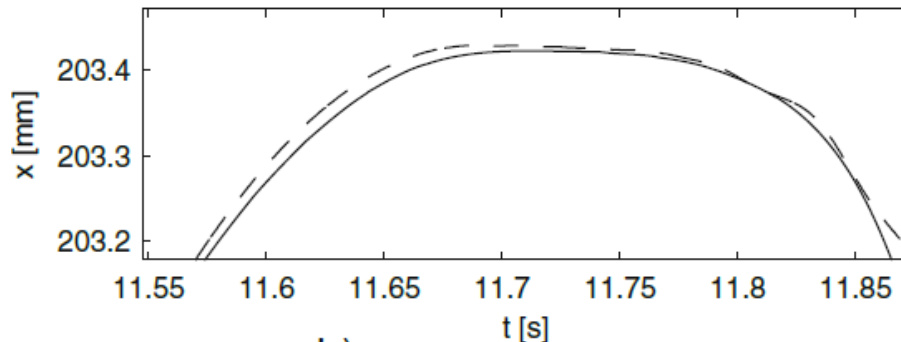


Comportamiento del modelo

- Comparación entre datos experimentales (línea sólida) y datos simulados (línea de puntos)



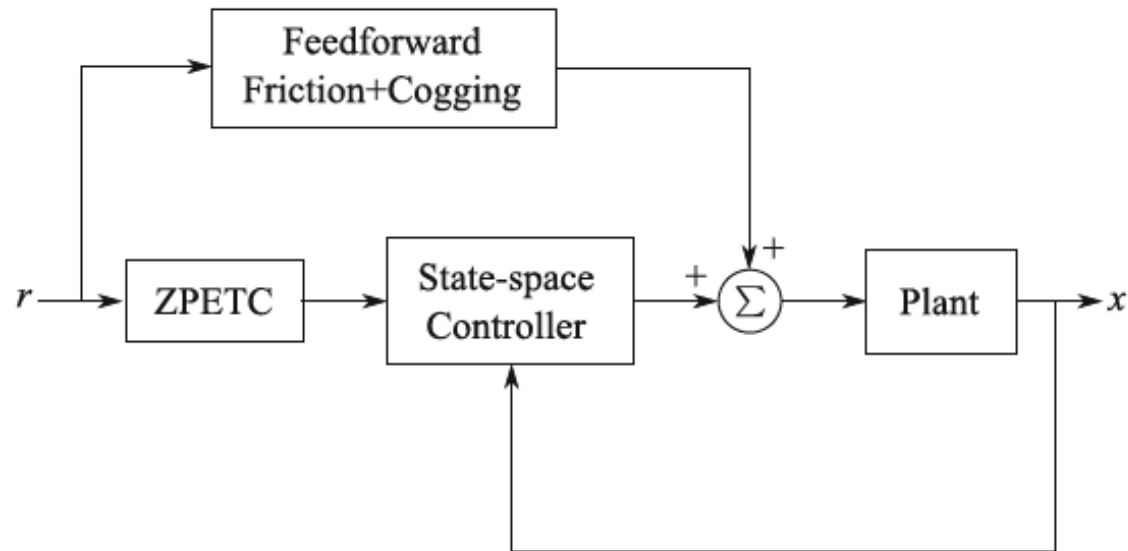
Simulación con solamente fricción estática



Simulación con el modelo GMS

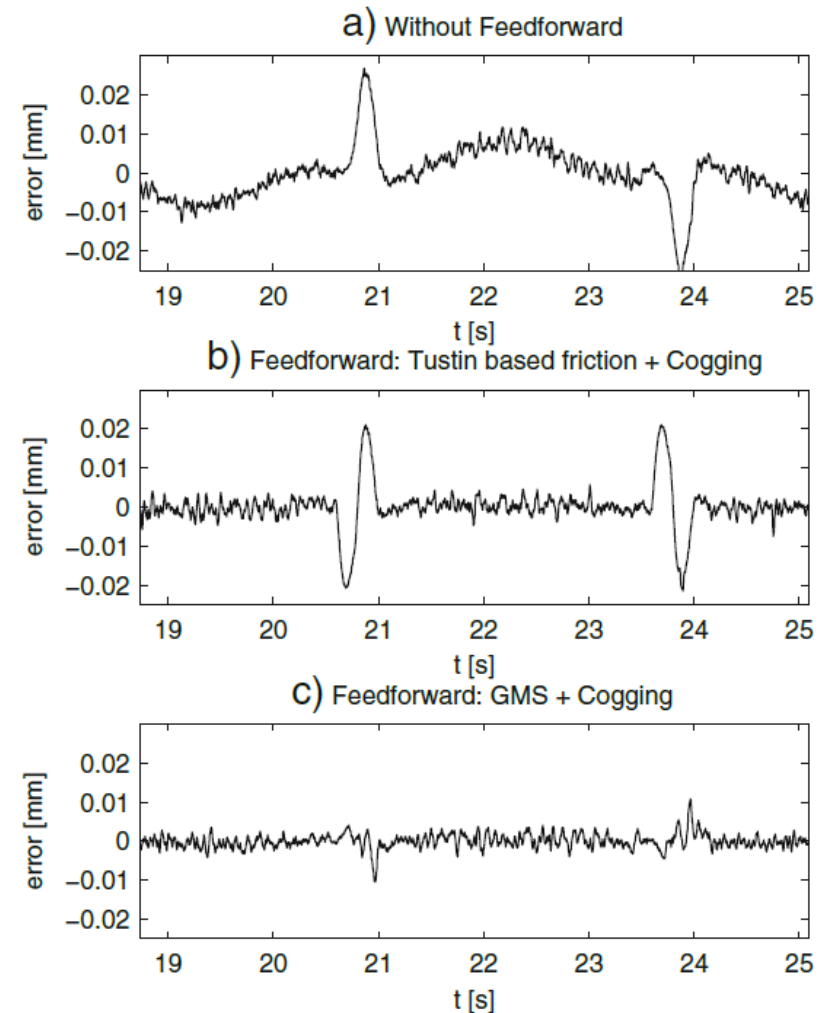
Compensación de la fricción

- Estrategia de control
 - Compensación feedforward de la fricción



Compensación de la fricción

- Resultados experimentales
 - Reducción del error en los cambios de dirección

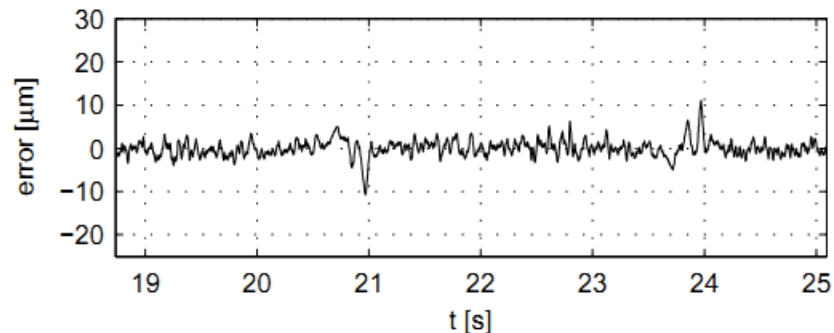


Ultraprecisión

- Sistemas convencionales
 - Los sistemas convencionales poseen un límite en el error debido a no linealidades difíciles de compensar
- Sistemas de ultrapresición
 - Sistemas *flexure stage* con actuador piezoeléctrico
 - Aplicación: Microelectrónica, fabricación de MEMS, metrología, microscopía de barrido, interferometría, micromaquinado, etc.

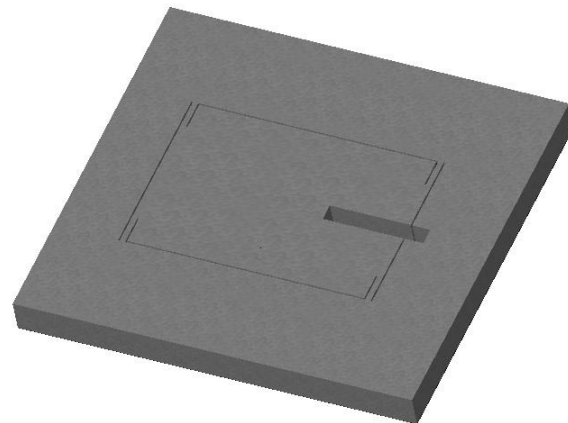
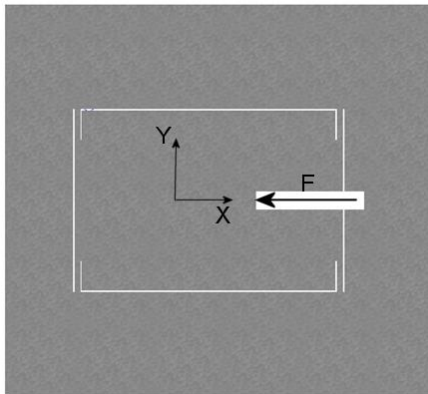
Requisitos de diseño

- Compensar errores de seguimiento, con altas velocidades y aceleraciones de un sistema convencional.
 - Configuración Dual.
 - Desplazamiento deseado $\pm 10 \mu\text{m}$
 - Ancho de banda: 100 Hz.
 - Frecuencia de resonancia del flexure stage superior a 1000 Hz.



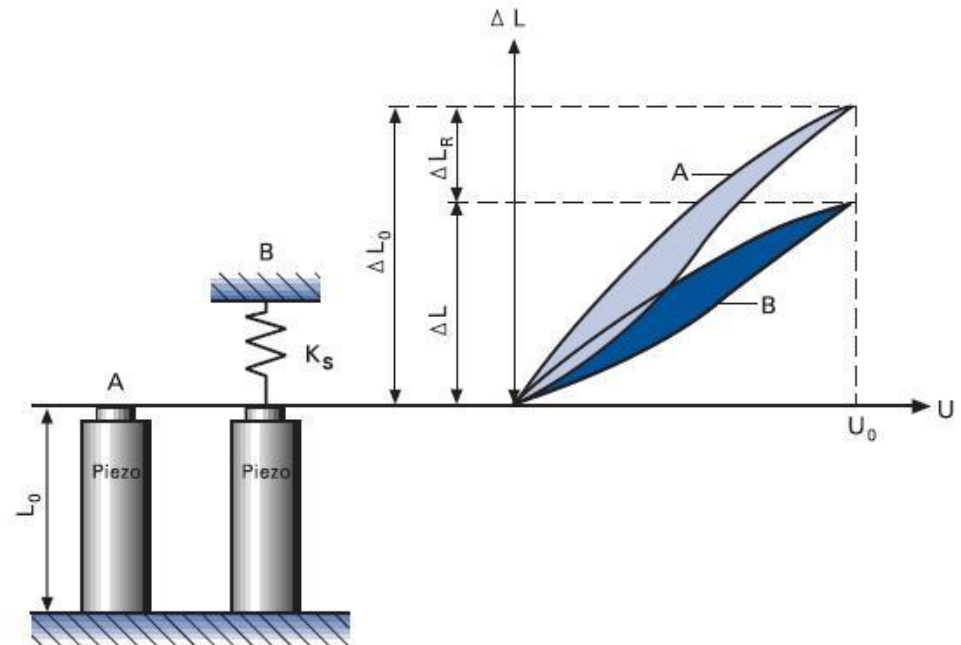
Flexure stage

- Configuración de doble paralelogramo.
- Frecuencia natural superior a 1000 Hz.
- Material de alta relación entre E y ρ . Se adopta aleación de aluminio.
- Ancho de la placa de 25 mm.
- Masa móvil de 1,5 kg.
- Para 1000 Hz se necesita una rigidez $k=60 \text{ N}/\mu\text{m}$.



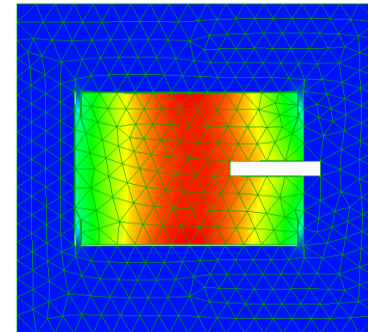
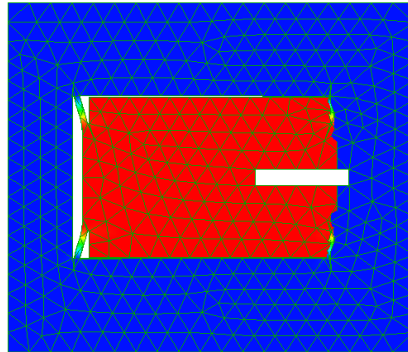
Actuador piezoeléctrico

- El conjunto *flexure* y actuador tienen características propias de
 - Desplazamiento máximo
 - Fuerza máxima
 - Frecuencia de resonancia



Resultados del conjunto

- Simulación por elementos finitos



- Características del actuador

ΔL_0 (μm)	k_p (N/ μm)	Fuerza (N)	Masa (gr)	F_0 (kHz)	Largo (mm)
45	75	3000	132	9	83

- Características del conjunto

ΔL_{eff} (μm)	F_{maxef} (N)
25	1335

Fin de la charla

Muchas Gracias!

Contancto: Rogelio Hecker

Email: hecker.rogelio@gmail.com

Estos proyectos fueron posibles gracias al financiamiento de:

