

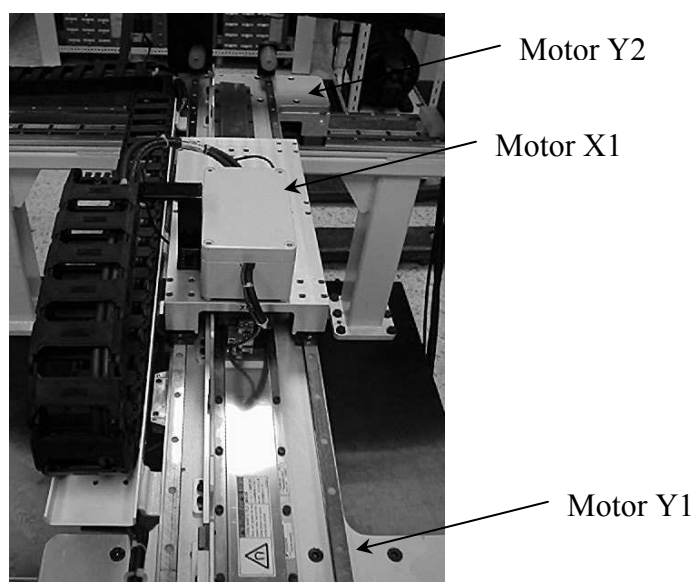
# Comparación entre motores rotativos con sinfín y corona, frente a motores lineales en un prototipo industrial

**Ing. Marcelo Castelli Léméz**

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática  
Campus Tecnológico de la Universidad de Navarra-TECNUN  
Facultad de Ingeniería – Universidad de Montevideo

## **Introducción**

En este artículo se plantea una aplicación industrial realizada conjuntamente con una empresa dedicada a la construcción de maquinaria especializada y el Laboratorio de Investigación en Máquinas Eléctricas de TECNUN. Se ha adaptado una máquina insertadora de componentes electrónicos construida hasta el momento con motores rotativos con sinfín y corona, a motores lineales, con el fin de aprovechar las ventajas significativas que ofrecen los motores lineales frente al sistema convencional de motor rotativo con sinfín y corona, en lo que respecta a velocidad, aceleración y precisión de posicionamiento. Se presenta en este artículo un resumen del proceso de adaptación y construcción de la máquina, así como los ensayos realizados y las comparaciones realizadas frente al sistema tradicional. El prototipo construido consta de dos ejes X e Y. En el eje Y se instalaron dos motores lineales, Y1 e Y2, los cuales moverán la bancada que contiene al eje X. Por dicho eje se desplaza un motor lineal sobre el cual se encuentra un cabezal provisto con dos insertadoras neumáticas de componentes electrónicos en las tarjetas de control. El peso total a ser desplazado es de 80Kg, mientras que el peso del cabezal es de aproximadamente 35Kg. En la Figura 1 se puede apreciar el montaje de los motores para trabajar en vacío.



*Figura 1. Prototipo en vacío*

## Diseño del prototipo

En esta etapa se estudiaron los requerimientos de las máquinas industriales de precisión a desarrollar, con el fin de poder determinar las especificaciones de los motores lineales. Para ello ha sido necesario trabajar en conjunto con la propia empresa analizando versiones ya construidas de las máquinas industriales llamadas a ser sustituidas, analizando sus características dinámicas y estructurales, para de esta forma mejorarlas a través de la implementación de servomotores lineales. Las necesidades de desplazamiento, velocidades y aceleraciones y las variaciones sucesivas propuestas por la empresa han sido tenidas en cuenta en esta etapa.

### Selección de servomotores lineales

Luego de estudiados los requerimientos de los servomotores lineales, se pasó a la selección de motores lineales comerciales que se ajusten a las especificaciones anteriormente descritas. Se han analizado distintos tipos de motores lineales para esta aplicación, teniendo en cuenta su concepto de funcionamiento y su geometría.

Con respecto a su funcionamiento, se han analizado las siguientes gamas de servomotores: servomotor lineal asíncrono, servomotor lineal síncrono de imanes permanentes, servomotor lineal síncrono de imanes permanentes sin hierro en primario y secundario, y se renunció por no idóneos a analizar otros tipos de motores como servomotor lineal paso a paso, servomotor lineal de reluctancia, y servomotor lineal de corriente continua, con y sin escobillas.

Respecto a la geometría de los motores lineales, las configuraciones más comunes son las planas y las tubulares. No obstante, caben todo tipo de geometrías y se estudiaron las configuraciones óptimas para este tipo de aplicación.

Después de un estudio pormenorizado, se han definido puntualmente los servomotores lineales comerciales a utilizar en el prototipo, en función de los requerimientos dinámicos y estructurales que presenta la aplicación a realizar. Los motores finalmente seleccionados son motores lineales síncronos de imanes permanentes pertenecientes a la empresa Yaskawa, cuyas principales características se muestran en la Tabla 1.

Tensión (V)	400
Velocidad nominal (m/s)	1,5
Velocidad máxima (m/s)	5,0
Fuerza nominal (N)	560
Fuerza máxima (N)	1200
Corriente nominal (Arms)	4
Corriente máxima (Arms)	9,5
Masa (Kg)	6,9
Constante de fuerza (N/Arms)	150,4

Tabla 1. Principales características de los servomotores seleccionados

### Captadores de posición, controladores y programación

En primer lugar, se ha seleccionado el equipo de captación de posición a ser utilizado en el prototipo a construir. Se ha optado por un encóder lineal, el cual provee una señal analógica de 1Vpp y 20µm de período, las cuales mediante una electrónica de interpolación acoplada a los controladores nos proporcionan una señal de tipo TTL con una resolución de 1µm.

Se ha realizado un análisis de los sistemas de alimentación y control para los motores seleccionados, y un estudio de los lenguajes de programación.

Para el estudio de los sistemas de alimentación y control, así como también de los diferentes lenguajes de programación y su adaptación a motores lineales, se han seguido los siguientes pasos:

- Control de motores rotativos con el sistema de alimentación y control utilizable con motores lineales.
- Programación de movimientos y sincronización de movimientos en dos ejes con motores rotativos
- Extrapolación del control de motor rotativo al motor lineal.

- Análisis a escala de las características dinámicas de un motor lineal de menor tamaño que los de la familia de los seleccionados.

Una vez culminada esta etapa, se han presentado perfiles de velocidad y fuerza alcanzables con los servomotores lineales seleccionados. El siguiente gráfico corresponde al perfil de velocidad del ciclo más exigente para el eje X del prototipo con servomotores lineales.

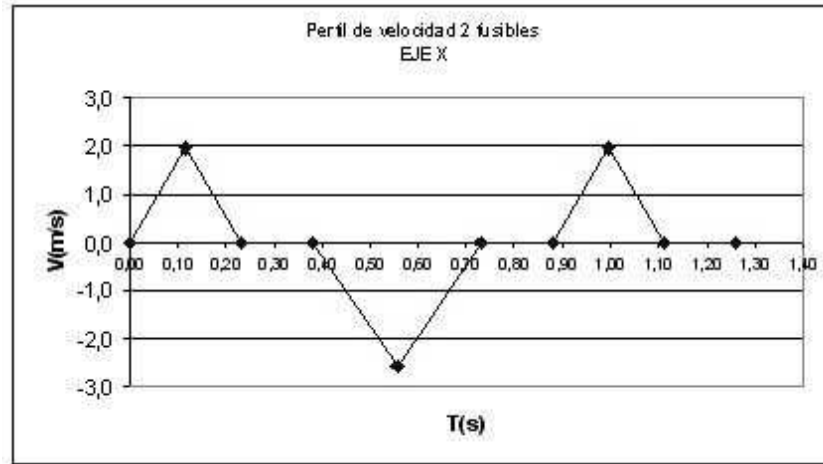


Gráfico 1. Perfil de velocidad en función del tiempo

Según este ciclo de trabajo, en este eje se alcanzarían velocidades de hasta 2,57m/s (154m/min), con aceleraciones de hasta 1,7G y una fuerza media desarrollada por el motor de 476N.

A partir de la selección de los servomotores lineales a ser colocados en el prototipo, se pasó al diseño del mismo, partiendo de un análisis teórico-experimental de las características dinámicas y térmicas de los servomotores lineales. Se han modelizado los motores lineales mediante programas de software basados en el método de los elementos finitos para determinar su comportamiento térmico en regímenes de alta exigencia. Mediante este estudio se han podido diseñar distintas piezas de la bancada con el fin de determinar sus características térmicas y estructurales.

### Construcción del prototipo de laboratorio.

La construcción del banco de ensayos para servomotores lineales se realizó íntegramente en la empresa ya que se cuenta en esta etapa con la experiencia de sus técnicos en diseño y construcción de maquinaria especializada.

El posicionador de dos ejes es el elemento clave en la máquina insertadora final; ha sido montado en la empresa y, por economía en movilidad de personal, ha sido trasladado al Laboratorio de Investigación en Máquinas Eléctricas para su puesta a punto y para desarrollar múltiples estudios y ensayos. Sobre él se han realizado ensayos que puedan garantizar que las prestaciones alcanzables superan a las obtenidas con un sistema con motor rotativo con sinfín y corona, en fiabilidad, horas de trabajo continuo, ausencia de paradas, etc.

A su vez, en esta etapa se construye el armario eléctrico que alberga los elementos de control, alimentación y protecciones del prototipo. Este armario ha sido construido y montado en la empresa y trasladado posteriormente al Laboratorio para el aprendizaje de la programación de la tarjeta posicionadora multieje que será utilizada para esta aplicación, así como también para la realización de pruebas de programación y posicionado con motores rotativos convencionales. En las Figuras 2 y 3 se pueden apreciar fotografías tanto del prototipo terminado y listo para ser ensayado en vacío, como del armario eléctrico utilizado para esta aplicación, respectivamente.

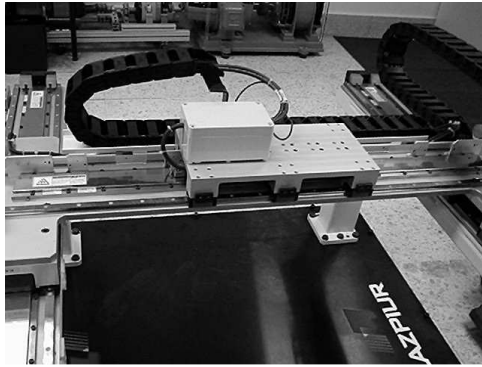


Figura 2

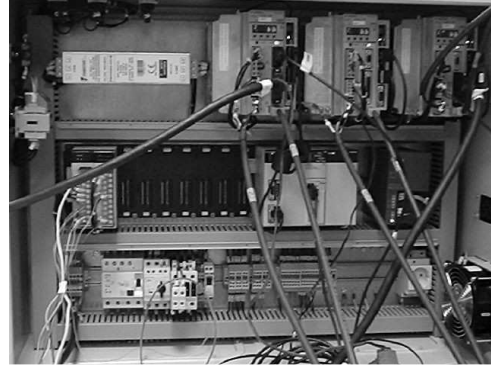


Figura 3

Cabe resaltar que tanto el prototipo como el armario eléctrico han sido fabricados íntegramente con componentes comerciales.

### Ensayos realizados

Ya con el prototipo finalizado, con un peso de aproximadamente 35Kg sobre el motor del Eje X, e instalado en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas, se han realizado diversos ensayos. En las figuras 4 y 5 se puede apreciar el montaje final del prototipo, con el peso simulando el cabezal insertador de componentes.



Figura 4. Vista general del prototipo

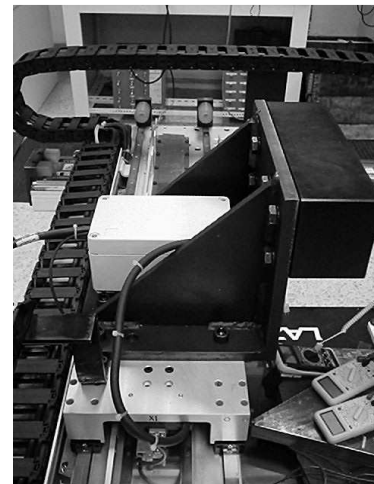


Figura 5. Ampliación cabezal eje X

### Perfiles de posición

Para realizar el seguimiento en posición del prototipo se han realizado adquisiciones de datos mediante tarjetas de adquisición y control dSPACE DS-1102 para seguimiento de la posición del conjunto. Se han debido utilizar estas tarjetas ya que la resolución de los programas que se proporcionan comercialmente para este fin no era la adecuada para los requerimientos del sistema.

Se han ensayado dos tipos de movimientos distintos, dentro de los límites de carrera establecidos previamente con la empresa, y se han diseñado dos perfiles de movimiento. El primero corresponde a la inserción de un componente en el punto más alejado del plano delimitado por las carreras máximas de los motores en los ejes X e Y, y el segundo corresponde a la inserción de dos componentes, uno en cada extremo del plano XY. Ambos perfiles diseñados contemplan un tiempo de parada para recogida del componente electrónico y de inserción del mismo, de 0,1s.

A continuación se presentan los perfiles de posición para la inserción de 1 y 2 componentes:

#### Perfil de inserción de 1 componente:

- Ciclo: movimientos simultáneos en eje X y eje Y con recorridos tal como se muestra en los cuadros siguientes.
- Tiempo de ciclo: 1000ms
- Tiempo de parada: 200ms
- Repetitividad: <5um

Eje X:

Carrera máxima (mm)	270
Velocidad máxima (m/s)	1,24
Aceleración máxima (m/s <sup>2</sup> )	15,5

Eje Y:

Carrera máxima (mm)	420
Velocidad máxima (m/s)	1,93
Aceleración máxima (m/s <sup>2</sup> )	24

El Gráfico 2 muestra el perfil de posición en función de tiempo para el ciclo de inserción de 1 componente, mientras que el Gráfico 3 muestra una ampliación del Gráfico 2, en el cual se puede observar el error en posicionamiento durante el tiempo de inserción. Es de destacar que se especificó por parte de la empresa que este error debía ser menor a 0,1mm, obteniéndose errores de menos de 25µm (Gráfico 3).

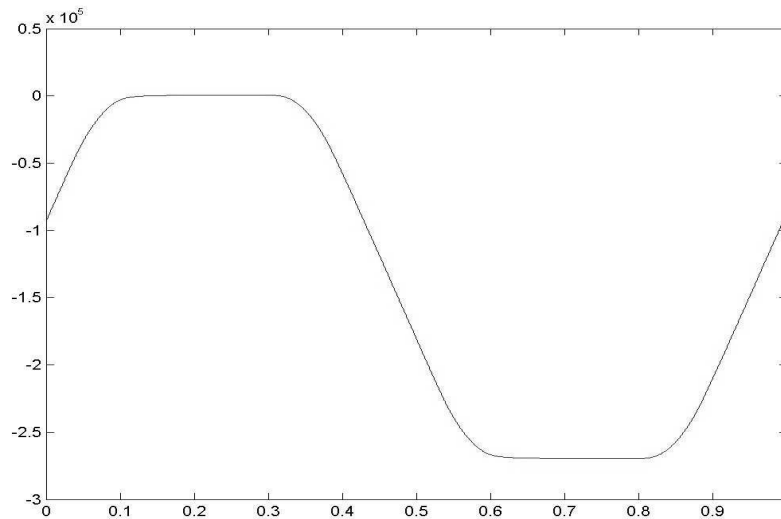


Gráfico 2. Posición (µm) en función del tiempo (s)

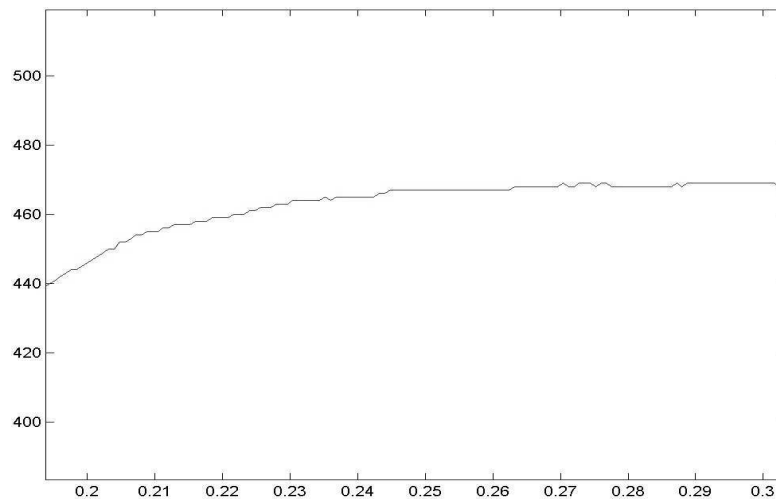


Gráfico 3. Ampliación Posición (µm) en función del tiempo (s)

Perfil de inserción de 2 componentes:

- Ciclo: movimientos simultáneos en eje X y eje Y con recorridos tal como se muestra en los cuadros siguientes.
- Tiempo de ciclo: 1300ms (650ms/fusible)
- Tiempo de parada: 200ms
- Repetitividad: <2µm

Eje X:

Carrera máxima (mm)	270
Velocidad máxima (m/s)	1,1
Aceleración máxima (m/s <sup>2</sup> )	15
Error en posicionamiento (en paradas de 100ms)	<25um

Eje Y:

Carrera máxima (mm)	420
Velocidad máxima (m/s)	1,74
Aceleración máxima (m/s <sup>2</sup> )	25
Error en posicionamiento (en paradas de 100ms)	<25um

El Gráfico 4 muestra el perfil de posición en función de tiempo para el ciclo de inserción de 2 componentes, mientras que el Gráfico 5 muestra una ampliación del Gráfico 4, en el cual se puede observar el error en posicionamiento durante el tiempo de inserción. La especificación de error en posicionamiento por parte de la empresa fue, como para el caso de inserción de 1 componente, de 0,1mm.

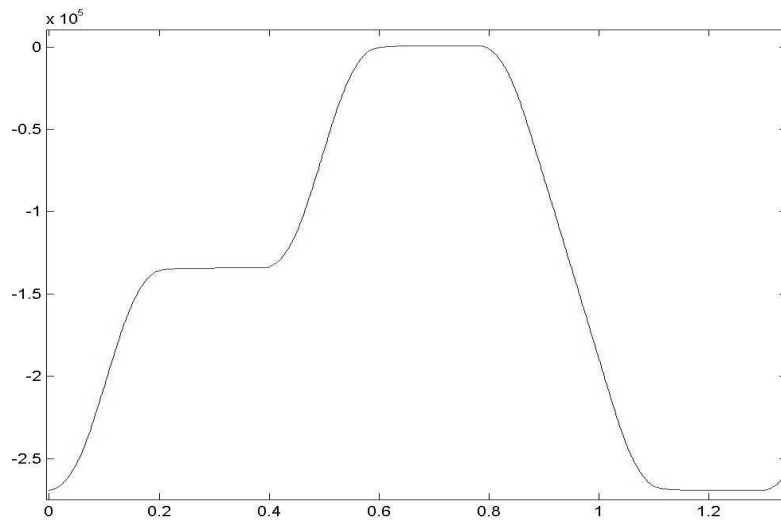


Gráfico 4. Posición (µm) en función del tiempo (s)

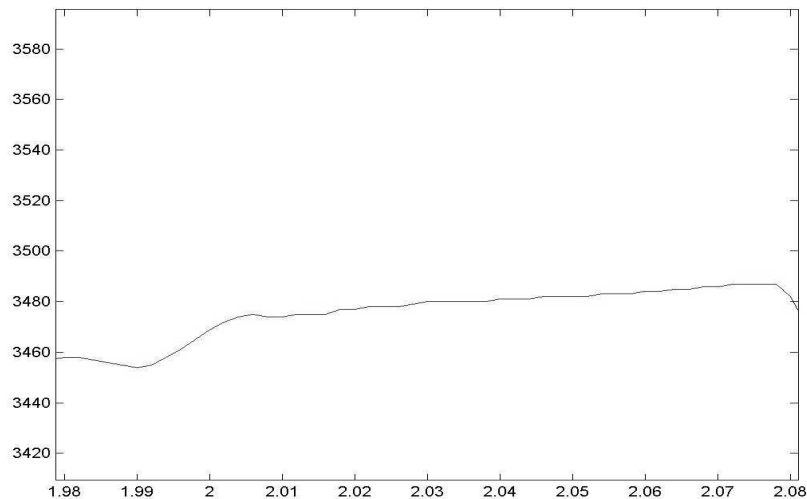


Gráfico 5. Ampliación Posición (µm) en función del tiempo (s)

### Ensayos de temperatura

Para la realización de los ensayos de temperatura se han utilizado 6 termopares, conectados a multímetros digitales, los cuales proveen una precisión de medida de 0,1°C, siendo ello más que suficiente para esta aplicación.

Se han realizado ensayos de temperatura en funcionamiento continuo, tanto de los 3 servomotores lineales como de diferentes puntos críticos de la bancada.

Los ensayos realizados han durado 8hs 30min, observándose una estabilización del sistema a partir de las 3 primeras horas de funcionamiento. Las temperaturas de estabilización del sistema se presentan a continuación:

- Temperatura en el motor del eje X: 33°C (Termopar 2)
- Temperatura en el motor del eje Y1: 63°C (Termopar 3)
- Temperatura en el motor del eje Y2: 63°C (Termopar 4)
- Debajo y en el centro de la bancada del motor del eje X (aluminio): 30°C (Termopar 1)
- Debajo y en el centro de la bancada del motor del eje Y (acero): 39°C (Termopar 5)
- Debajo y en un extremo de la bancada del motor del eje Y (acero): 27°C (Termopar 6)

A continuación, en la Figura 6 se adjunta el esquema en donde se detalla la posición de los termopares en el prototipo:

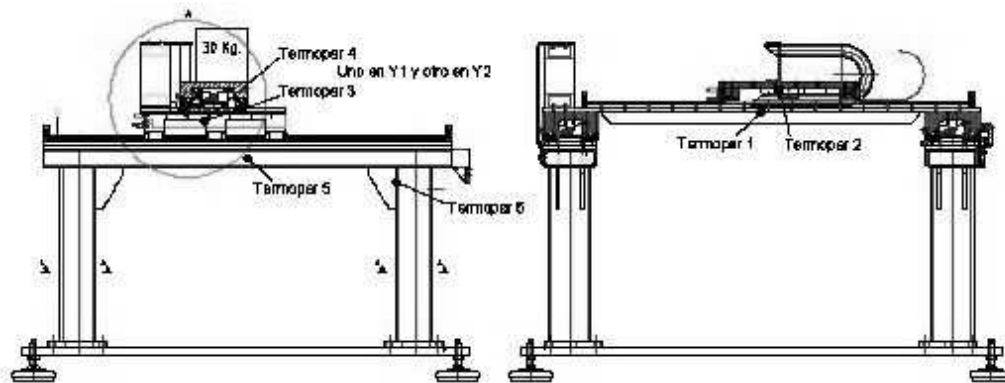


Figura 6. Posición de los termopares en el prototipo.

En el Gráfico 6 se representa el perfil de temperatura (°C) en función del tiempo (min) para las 8hs 30min que ha durado el ensayo.

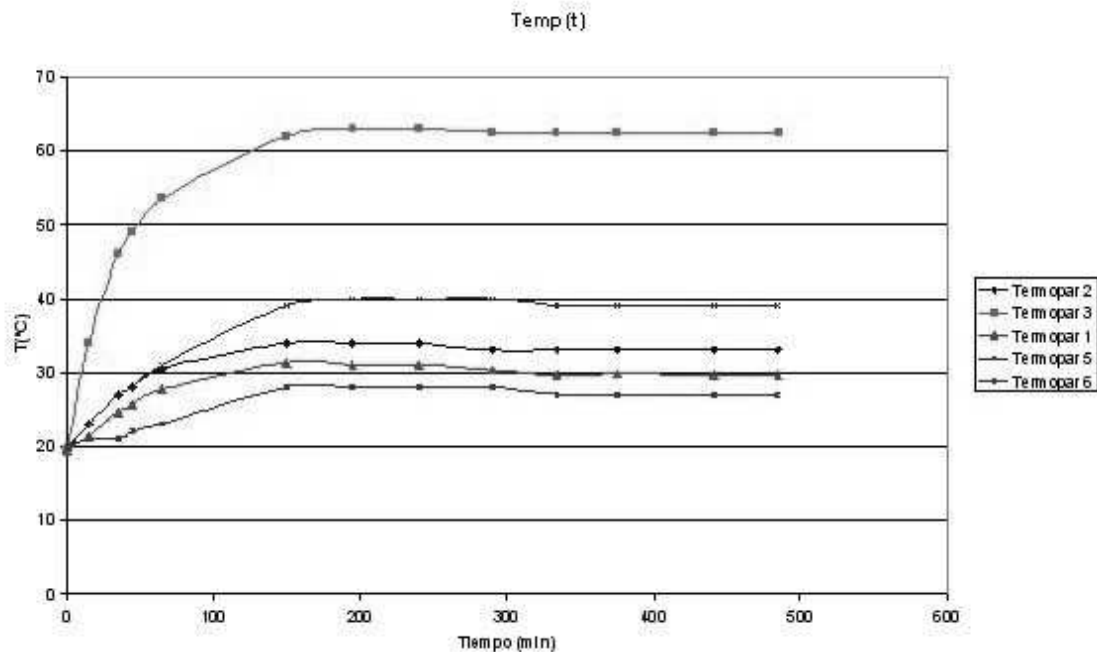


Gráfico 6. Temperatura (°C) en función del tiempo (min)



Teniendo en cuenta que la temperatura de funcionamiento normal de los motores en régimen continuo es de 100°C, se puede concluir que se encuentran trabajando por debajo de sus prestaciones máximas.

### Ensayos de vibraciones

Mediante la utilización de acelerómetros, se han medido los desplazamientos máximos de la bancada, tanto en el sentido del eje X, como del eje Y, obteniéndose los siguientes resultados:

- Desplazamiento de la bancada debido al movimiento en el eje X: 500µm.
- Desplazamiento de la bancada debido al movimiento en el eje Y: 750µm.

Estos desplazamientos son de tipo repetitivo y se realizan de forma elástica en cada ciclo del prototipo. Para anular estos desplazamientos es necesario reforzar la estructura de la máquina, ya que debido a las aceleraciones y fuerzas desarrolladas por los servomotores lineales, no se puede pensar en utilizar la misma bancada diseñada para motores rotativos con sinfín y corona.

### Resultados

En este apartado se presenta una tabla comparativa de las prestaciones alcanzadas en esta aplicación con el sistema tradicional de actuación lineal en contraste con la utilización de servomotores lineales.<sup>1</sup>

	Motor Rotativo con Sinfín y Corona	Servomotores Lineales
Tiempo de ciclo (Inserción de dos Componentes)	2400ms	1300ms
Precisión en posicionamiento	100µm	<25µm
Velocidad máxima	1,5m/s(*)	3m/s (**)
Aceleración máxima	10m/s <sup>2</sup> (*)	100m/s <sup>2</sup> (**)
Costo (en este prototipo, por motor, controlador incluido)	€2700	€3000
Potencia consumida (por motor)	1,5KW	1,5KW

(\*) Datos nominales de motores rotativos.

(\*\*) Datos obtenidos de ensayos realizados en el prototipo con carga.

### Conclusiones

Los servomotores lineales presentan grandes ventajas en lo que respecta a aceleraciones, velocidades, posicionamientos y desgaste de piezas, con respecto a los sistemas tradicionales de movimiento lineal, pero se debe tener en cuenta que no se puede trasladar directamente un actuador lineal que utiliza motores rotativos convencionales a la utilización de motores lineales. Se debe replantear el sistema, utilizando motores lineales, ya que la utilización de éstos implica cambios con respecto a los sistemas tradicionales. Por ejemplo, a la hora del diseño de la estructura soporte del sistema, con la utilización de motores lineales deberán tenerse en cuenta las aceleraciones a las que se encuentre sometida, ya que serán mayores que mediante la utilización del sistema tradicional de actuación lineal.

Otro punto a tener en cuenta a la hora de implementar servomotores lineales como soluciones industriales, es la energía regenerativa que deben disipar los controladores. Debido a las grandes aceleraciones que pueden desarrollar esta clase de motores, se debe pensar en la utilización de resistencias regenerativas externas, como forma de disipación de energía y protección de los controladores.

Las pérdidas de energía por rozamiento, que suelen ser un problema bastante importante a la hora de utilizar actuadores lineales convencionales, se suprimen casi por completo con un sistema pensado con motores lineales, ya que se eliminan totalmente los dispositivos para transmisión de movimiento, con sus consecuentes pérdidas de energía.

<sup>1</sup> G. Martínez, M. Martínez-Iturralde, A. García Rico, J. Flórez, "Motores lineales en Máquina - Herramienta. Tipología y características electromagnéticas y dinámicas", XV Congreso de Máquinas - Herramienta y Tecnologías de Fabricación, vol. 1, pp. 381 - 400 San Sebastián, 20,21 y 22 de octubre de 2004, I.S.B.N. 931828-7-7.

En consecuencia, la utilización de los servomotores lineales en aplicaciones industriales que requieran alta velocidad y precisión puede resultar muy ventajosa, teniendo en cuenta un análisis técnico cuidadoso de los diferentes requisitos necesarios para su utilización.