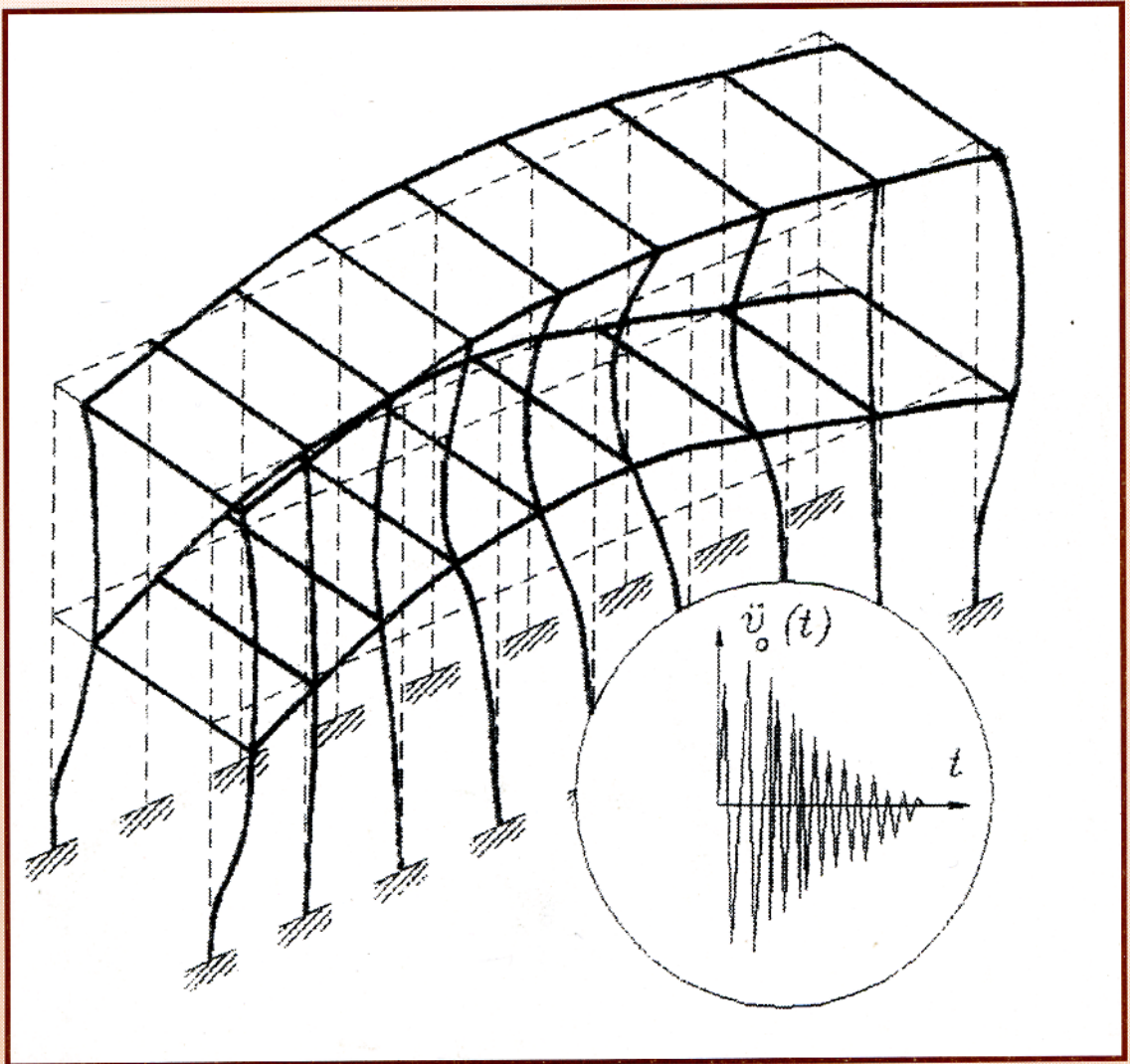


Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica
Julio/Diciembre 1997 VOLUMEN 7 Nº 2



INGENIERIA

Revista Semestral de la Universidad de Costa Rica
Volumen 7, Julio/Diciembre 1997 Número 2

DIRECTOR

Rodolfo Herrera J.

CONSEJO EDITORIAL

Víctor Hugo Chacón P.

Ismael Mazón G.

Domingo Riggioni C.

CORRESPONDENCIA Y SUSCRIPCIONES

Editorial de la Universidad de Costa Rica
Apartado Postal 75
2060 Ciudad Universitaria Rodrigo Facio
San José, Costa Rica

CANJES

Universidad de Costa Rica
Sistema de Bibliotecas, Documentación e Información
Unidad de Selección y Aquisiciones-CANJE
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio
San José, Costa Rica

Suscripción anual:

Costa Rica: ₡ 1 000,00

Otros países: US \$ 25,00

Número suelto:

Costa Rica: ₡ 750,00

Otros países: \$ 15,00



MOTORES LINEALES

Ing. Horacio Vásquez Céspedes, M. Sc.¹

Resumen

Este artículo analiza y comenta la más reciente tecnología en motores lineales y se describen sus ventajas y desventajas al compararlos con la tecnología empleada anteriormente para realizar la misma función. Además, se mencionan sus principales aplicaciones.

Summary

This article analyses and comments the most recent technology related to linear motors, and describes its advantages and drawbacks when comparing to the prior technology used to perform the same task. Besides, the main applications of this type of motors are presented.

1. INTRODUCCIÓN

Si bien los motores lineales son de una tecnología que no es nueva, su uso ha surgido como una necesidad de continuar mejorando la exactitud en el posicionamiento, de desarrollar un alto rango de velocidades y otros aspectos que son importantes para los miembros móviles de máquinas-herramienta, robots y gran variedad de sistemas similares. Esto se debe a limitaciones tecnológicas a las que se ha llegado en la investigación y desarrollo de los tornillos de esferas recirculantes, los cuales ejecutan el mismo trabajo que los motores lineales y en el futuro serán, en muchas aplicaciones, reemplazados por estos últimos.

2. ANTECEDENTES

Los sistemas tradicionales más utilizados para accionar los posicionadores lineales en las máquinas-herramienta CNC (control numérico computadorizado) consisten en servomotores rotativos acoplados a un conjunto tornillo-tuerca de esferas recirculantes, o tornillos de esferas. Los servomotores son motores optimizados en función de su estática y dinámica, pueden ser

comandados en posición y/o velocidad y responden a tales comandos con rapidez y precisión [9]. Estas características son las que los hacen aptos para aplicaciones en máquinas-herramienta y robótica.

Los movimientos lineales en las máquinas-herramienta se han realizado con mecanismos diseñados para convertir movimiento rotacional en movimiento lineal, tales como tornillos de esferas recirculantes, cremalleras, levas y también con cilindros neumáticos o hidráulicos. Sin embargo, estos métodos presentan algunas desventajas como el hecho de que los cilindros hidráulicos generan grandes fuerzas, pero a bajas velocidades; los cilindros neumáticos son rápidos, pero poseen poca rigidez; y los motores rotacionales acoplados con tornillos de esferas pueden generar fuerzas grandes, pero sacrifican la velocidad cuando el paso del tornillo se reduce para lograr mayor exactitud en el posicionamiento. Además, para todos estos sistemas se requiere mantenimiento constante, y existe desgaste con el tiempo lo cual puede generar errores. Los motores lineales son una nueva opción que, sin presentar las desventajas de los sistemas mencionados, pueden realizar el mismo trabajo y se acoplan directamente al

¹ Universidad de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Mecánica

soporte o punto de la herramienta, eliminando así los mecanismos de transmisión de movimiento[10].

Debido a la necesidad por obtener mayor velocidad y exactitud, los motores lineales son de gran aplicación en máquinas-herramienta. Como se mencionó arriba, la competencia de los motores lineales la hacen los tornillos de esferas, los cuales son versátiles, simples, baratos y ampliamente aceptados en la industria. A pesar de que los industriales buscan cómo introducir los motores lineales en sus operaciones, es muy difícil, desplazar a los tornillos de esferas. La debilidad de estos últimos consiste en que, cuando se desean lograr altas velocidades simultáneamente a altas exactitudes, estos tornillos generan errores debido a su comportamiento elástico y térmico, lo mismo que ocurre con el eje del motor. Los reductores de velocidad utilizados para acoplar motores a los tornillos de esferas tienen la desventaja de agregar inercia y holguras al sistema. La tuerca del tornillo presenta otro problema bajo circunstancias de alta velocidad y esfuerzo, pues se desarrolla cierto desgaste, el cual genera inexactitudes. Además, el peso de la mesa deslizante acoplada al tornillo de esferas contribuye en cerca del 30% de la inercia del sistema, siendo el otro 70% del tornillo y el motor. Existen tornillos de esferas que pueden moverse a 60 m/min y acelerar a 1g, con 2 μ m de repetibilidad. En estos tornillos los problemas de calentamiento se compensan con sensores y con el sistema de control, o pueden eliminarse o atenuarse al utilizar ejes huecos que se enfrían con algún refrigerante. Los motores lineales son 30 veces más veloces que los tornillos de esferas, la aceleración puede ser de 5g o mayor, y su rigidez es siete veces mayor; así reducen considerablemente el tiempo en que la máquina se encuentra desplazándose sin cortar [1].

3. MOTORES LINEALES

En la figura 1 se muestra un motor lineal acoplado a una mesa con guías. También se muestran los embobinados primario y secundario, el cable de alimentación del primario

y una escala lineal para realimentación. Uno de los tipos de motores lineales es el de inducción, en el cual el primario es un embobinado trifásico y el secundario es un embobinado tipo jaula de ardilla [3]. Un motor lineal de inducción (LIM) es básicamente un motor rotacional de tipo jaula de ardilla desdoblado, que en lugar de producir torque para una máquina rotacional, produce fuerza para una máquina lineal [4]. Se utilizan en aplicaciones en las que se requieren fuerzas considerables a bajos ciclos, pero sin alto grado de exactitud en el posicionamiento. Estos motores son ideales para desarrollar movimiento ilimitado, ya sea horizontal, inclinado o vertical, y por lo tanto se utilizan en sistemas de transporte de personas y equipajes, en sistemas de parques recreativos, y en puertas deslizantes. Este tipo de motores pueden desarrollar hasta 180 m/min y 100 m/s² [3].

Existen motores lineales tales que el estator consiste en dos embobinados separados por una ranura en la cual se coloca y desplaza el cursor. Por ejemplo, los motores lineales utilizados en el tren Mr. Freeze, en Inglaterra, consisten en dos embobinados que crean un campo magnético muy fuerte en el espacio que se encuentra entre ellos. Cuando un conductor, como las barras de aluminio en el caso del tren Mr. Freeze, se coloca en el espacio entre los embobinados, el campo magnético cambiante induce corrientes eléctricas en el conductor y estas corrientes crean su propio campo magnético. Así, los dos campos magnéticos interactúan y crean la fuerza de empuje que mueve al tren en la dirección deseada [7].

Otro tipo de motor lineal es el de imanes permanentes, el cual tiene un embobinado ya sea DC o trifásico, y utilizan la vía magnética (los imanes permanentes) en cualesquiera de las dos posiciones: en el estator, o en la parte móvil (cursor) [6]. Los motores DC con control a lazo cerrado son ideales para posicionamientos exactos, y para desarrollar velocidades y aceleraciones elevadas.

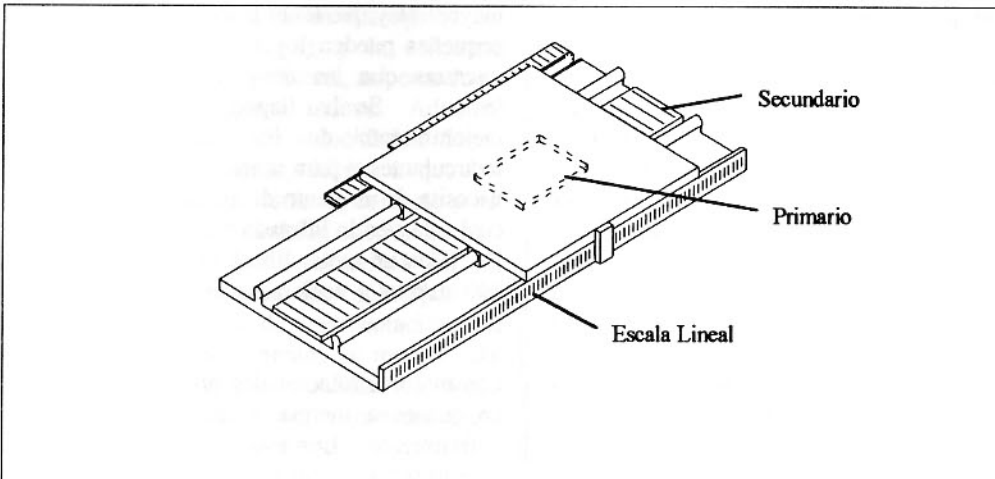


Figura 1. Motor lineal instalado en una mesa con guías

Existen también motores lineales de pasos, los cuales son capaces de lograr altas velocidades con posicionamiento sin necesidad de realimentación, o sea, con control de lazo abierto. En estos motores el embobinado primario está en el cursor, y el secundario consiste en dientes magnéticos de acero [10]. Pero para lograr posicionamientos submicrométricos, es necesario utilizar escalas optoelectrónicas o láser interferométrico, debido a la variación de la fuerza de traslación (*cogging*) [9]. Sus aplicaciones típicas son en máquinas de coser automáticas, máquinas de ensamble e inspección y sistemas de transporte de piezas.

Los motores lineales son de gran utilidad en aplicaciones que requieren gran velocidad, movimientos repetitivos y movimientos cortos de alta velocidad. Compañías tales como Indramat y Anorad se han interesado grandemente en el desarrollo y aplicación de los motores lineales y en los últimos años se han movido hacia su aplicación en las máquinas-herramientas. Algunos expertos han mencionado que las máquinas-herramienta deben adaptarse en diseño y aplicación a los motores lineales, ya que no se trata de poner un motor lineal a una máquina y proceder a trabajar. Esto

se debe a que las guías son diferentes, pues en lugar de acoplarse a un tornillo de esferas, deben hacerlo a los embobinados e imanes del motor lineal.

Un motor lineal es como un motor rotacional estirado que en su aplicación elimina todos los componentes mecánicos de la transmisión, reduciendo así la pérdida de movimiento y aumentando la rigidez. La empresa Indramat ofrece motores lineales de inducción, los cuales operan como un motor CA, y también ofrece motores lineales de imán permanente, que funcionan como un servomotor sin escobillas. Los motores de imán permanente son más eficientes porque no inducen un campo magnético, como lo hacen los motores de inducción. Además, los motores de imán permanente tienen una mayor densidad de fuerza y necesitan menos enfriamiento. Por el contrario, su ensamble y manejo es más difícil por su fuerte campo magnético; y necesitan una comunicación compleja a través de sensores de efecto Hall, conexiones DC, o una escala lineal absoluta. Hasta recientes avances en tecnología digital, los motores de inducción no se controlaban con gran exactitud, por lo tanto el motor de imán permanente ha sido el preferido en la industria. Este motor, sin embargo,

requiere de cobertura especial debido a que sus imanes recogerían chips y otros depósitos metálicos que se encuentren cerca de su espacio de acción.

El motor de inducción, como su nombre lo dice, induce un campo magnético en el embobinado, y por lo tanto es menos eficiente, la densidad de fuerza es menor y enfriar el secundario puede ser necesario. No tiene imanes en el secundario, por lo que la atracción magnética ocurre sólo cuando el primario es energizado. El primario se alinea fácilmente con el secundario y solo realimentación incremental es necesaria para llevar a cabo la comunicación y el posicionamiento. Los motores de inducción son más efectivos, económicamente, cuando son largos.

Ingersoll Milling ha construido y vendido máquinas-herramienta con motores lineales por 12 años, y ha vendido cerca de 80 unidades [1]. Su unión con Ford Motor Co. ha llevado a probar varias configuraciones y control de los sistemas, incluyendo de Fanuc y Anorad. El resultado fue una familia de centros de maquinado con cambio de herramientas para formado, taladrado, torneado y golpeado. Ford invirtió en dos sistemas, uno para maquinado de bloques de motor y el otro para maquinado de cabezas de cilindro. Se tiene la HVM 600 y la HVM 800 cuya diferencia es el volumen de espacio de trabajo. Se han desarrollado específicamente para el mercado aeroespacial. Su costo inicial es más alto, pero incluyendo su costo de operación, lleva a precios similares a las máquinas convencionales. Las máquinas con motores lineales son más versátiles, pero no son algo que una compañía puede diseñar y desarrollar bien en un tiempo corto [1].

Existe una revolución continua en la velocidad a la cual las máquinas-herramientas cortan metal, ésto ha requerido esfuerzos para la capacidad de aceleración y desaceleración de los motores. En 1980 el estándar en velocidad era 10 m/min, luego mejorando los tipos de control se logró 12 m/min, en 1985 se logró hasta 15 m/min, y 0.1g, en 1990 debido a mejoras en los tornillos de

esferas se logró 30 m/min y 0,25g. Hoy en día se puede lograr de 36 a 61 m/min y 0,25g o mayor. Hay que tener presente que las máquinas pequeñas pueden lograr velocidades más altas, mientras que las máquinas grandes son más lentas. Se ha llegado a un límite en el mejoramiento de los tornillos de esferas recirculantes y para ir más allá de este punto se necesita de un punto de quiebra en la técnica, lo cual está siendo liderado por los motores lineales [1]. Con un motor lineal se pueden lograr hasta 300 m/min y aceleraciones mayores a los 10g [5].

Los motores rotacionales presentan limitaciones en cuanto a inercia, velocidad, lubricación, y enfriamiento. Los motores lineales con acople directo son la mejor solución tecnológica a estos problemas. La confiabilidad y los costos deberán determinarse para asegurar ventaja económica. En este momento las máquinas con motores lineales cuestan de 1.5 a 3 veces lo que cuestan máquinas convencionales, pero se estima que se ocupan menos máquinas para realizar el mismo trabajo, ahorrando así espacio del piso e incrementando la producción, pudiéndose entonces equiparar precios [1].

Se han diseñado motores lineales de tipo tubular y de tipo plano. El motor lineal de tipo tubular tiene el eje junto con el embobinado secundario apoyado en cojinetes anti-fricción, y dentro de una envoltura totalmente encerrada en donde se encuentra el primario, que es un embobinado trifásico. El motor lineal tubular es recomendado para aplicaciones con recorridos que van hasta los 22 cm, y en los que se pueden alcanzar aceleraciones de hasta 200 m/s² [3].

La compañía Kollmorgen fabrica motores lineales de imán permanente sin escobillas y trifásicos. En motores lineales sin escobillas el secundario, o rotor en un motor rotacional, es llamado "vía magnetizada" o "vía de los imanes" (magnet track). El primario consiste en un embobinado trifásico original del estator de un motor rotacional pero en posición plana y se le llama "deslizador" (slider). En motores lineales sin escobillas es común que la vía de los imanes sea estacionaria, y por lo tanto el embobinado

sea la parte móvil [5]. Es también aceptable que los papeles se inviertan y en algunos casos es ventajoso. Estos motores tienen alta rigidez, no presentan holguras (backlash), y la conexión entre el motor y la carga es directa, así, cuando el motor se mueve la carga se mueve. Además, presentan un alto rango de velocidades, desde muy bajas hasta muy altas, debido a que las partes del motor lineal no están en contacto y no hay limitaciones de transmisión mecánica. Los movimientos suaves y la exactitud en el posicionamiento son limitados sólo por la resolución del mecanismo de realimentación. La integración de los componentes es mucho más simple que cuando se utilizan motores rotacionales con transmisiones mecánicas, pues no se necesitan alineamientos críticos.

4. APLICACIONES Y VENTAJAS DE LOS MOTORES LINEALES

Entre las aplicaciones de los motores lineales que necesitan movimientos rápidos y cargas ligeras a la hora de cortar, están las industrias de semiconductores, de maquinado con láser, cortado con chorro de agua, manufactura textil, empacado y termo-formado [3]. Las aplicaciones de los motores lineales van desde mover puertas deslizantes hasta mover vehículos de 10 toneladas [4]. Los motores lineales funcionan mejor con cargas livianas durante el maquinado; sin embargo, los motores lineales no son livianos. Aplicaciones prácticas actuales incluyen: alta velocidad no importando la precisión y control dinámico preciso para contornear, en donde velocidad y ruido eléctrico son importantes. Se dice que una de las ventajas a favor de los motores lineales es que, cuando se acelera no se corta y cuando se corta no se tienen aceleraciones elevadas y por lo tanto las fuerzas son bajas.

Las ventajas de los motores lineales son que eliminan los mecanismos de transmisión, su operación es silenciosa, reducen el mantenimiento, su tamaño es compacto, y son fáciles de controlar e instalar. Además, pueden ser utilizados en ambiente peligrosos y utilizan

mecanismos de efecto Hall para realimentación o, típicamente, un encoder lineal [4].

Según algunos industriales los motores lineales deben ser de alta rigidez y alta frecuencia natural de vibración, pues así se amortiguan vibraciones no deseadas. Su resultado es una muy suave primera pasada cuando se realiza el maquinado, eliminando la necesidad de pasadas adicionales. La rigidez se determina basándose en qué tan bien el sistema para mantener su posición ante cargas impulsivas.

Los motores lineales de tipo DC pueden ser capaces de desarrollar fuerzas que van desde unos pocos gramos hasta exceder 1000 Kg y pueden operar a velocidades que van desde 0,2 mm/min hasta 180 m/min. También son capaces de aceleraciones hasta de 10g y movimientos que van desde 250 μm hasta 7,5 m y se pueden posicionar con gran exactitud [10].

Con algunos motores lineales disponibles en el mercado se puede disponer de aceleraciones del orden de hasta más de 200 m/s^2 , exactitudes en el posicionamiento de 0,01 μm , gran control, libre mantenimiento, tecnología ruda y sin fuerzas de atracción magnética en el ensamblado [3].

5. DESVENTAJAS Y REQUISITOS AL UTILIZAR MOTORES LINEALES

Uno de los problemas de los motores lineales es la atracción magnética que se ejerce sobre la guía por el motor. Esta fuerza de atracción es típicamente 3 veces el empuje. Así un motor con un empuje de 1 KN ejercerá una fuerza adicional de 3 KN sobre las guías, afectando negativamente su vida útil. Este problema se resuelve montando los motores en parejas, espalda con espalda. Sin embargo, este arreglo es difícil de ensamblar, a veces comprometiendo la rigidez estática y dinámica de la mesa de la máquina, esto se resuelve utilizando un gran número de pequeños motores lineales en serie. Con los motores lineales se necesita una alta dedicación del CNC a las tareas del control del motor debido a la carencia de amortiguamiento

para absorber errores pequeños. Los motores lineales al no contar con amplificadores de fuerza, como ocurre en los motores rotacionales, pueden no ser una solución efectiva para aplicaciones que requieren grandes fuerzas y bajas velocidades [10].

Debido a que no hay apoyo, como con el tornillo de esferas, cuando se utiliza un motor lineal se debe agregar un mecanismo para apoyar la parte móvil. También, el eje vertical necesita un contrapeso para ayudar al movimiento en esta dirección, y todos los ejes necesitan un mecanismo de bloqueo en caso de falla de potencia.

Remover calor es una de las dificultades que se presenta a la hora de utilizar motores lineales, pues el calor fluye hacia la base de la máquina, y por lo tanto se necesita un tipo de enfriamiento con algún refrigerante [2]. En los motores rotacionales se utilizan aletas y el mismo movimiento del rotor para obtener convección forzada.

6. CONCLUSIONES

Los motores lineales son una solución a las limitaciones presentes en los sistemas más tradicionales que utilizan tornillos de esferas recirculantes para convertir un movimiento de rotación en un movimiento de traslación. Con los motores lineales se eliminan los mecanismos de transmisión, y con ésto se eliminan problemas de mantenimiento, desgaste, histéresis y rigidez, entre otros aspectos que perjudican el buen desempeño de las máquinas-herramienta. Si bien en la actualidad las máquinas-herramienta con motores lineales tienen un mayor costo, éstas operan a más altas velocidades y son más eficientes, ahorran espacio del piso y, por lo tanto, aumentan la productividad, equilibrándose con los costos de las otras máquinas. Los motores lineales tienen un futuro prometedor en gran variedad de aplicaciones.

A la fecha, existen muchos cuestionamientos acerca del uso y operación de motores lineales debido a la falta de experiencia con ellos. Por

ejemplo, no se sabe como los elementos magnéticos sobrevivirán en el ambiente de taller y si sistemas grandes mantendrán un rendimiento parecido a sistemas pequeños. También, se necesita conocer más acerca del consumo de energía y de las precauciones de seguridad en caso de fallo del fluido eléctrico.

7. BIBLIOGRAFÍA

Aronson, Robert B. Attack of the Linear Motors. Manufacturing Engineering, May 1997.

Beakley, Bruce. Optimizing Performance in Linear Motors. Motion. Vol. 11, No. 6, November/December 1995

<http://www.indramat.com/larlaf.html>

<http://www.force.co.uk/page2.html>

<http://kmtg.kollmorgen.com/html/description.html>

<http://normag.com/technology.html#principles>

<http://www.computek.net/public/gep2/lmswork.html>

Matsch, Leander. Máquinas Electromecánicas y Electromagnéticas. Arizona, International Textbook Company, 1972.

Rubio, J.C. Accionamiento directo de herramientas de corte en máquinas de ultra precisión. San Paulo, Brasil, 1998.

Wilson, Mark P. What is a Linear Motor? Motion. Vol. 11, No. 3, May/June 1995.