



# MOTORES LINEALES

Capítulo Cuarto

## UNA BREVE HISTORIA DE LOS MOTORES LINEALES

Las máquinas eléctricas rotatorias han existido por más de siglo y medio; los motores lineales fueron introducidos a finales del siglo XIX. En 1914 se discutía sobre su utilización, argumentando los que estaban a favor: que la fabricación de éstos requería de menos partes además de que su ensamblado era mucho más fácil. Sin mencionar la gran flexibilidad y mayor vida que tienen en comparación con los motores normales. Pero la electrónica necesaria para hacer funcionar a estos motores y la teoría de control no estaba desarrollada comercialmente aún, en esos tiempos.

Los que argumentaban en contra decían que estos motores tienen una baja eficiencia debida a su gran entrehierro. Por esta última razón fueron considerados malos y se detuvo su desarrollo hasta los años sesentas cuando lentamente volvieron a resurgir, pero en los últimos 35 años se han tomado más en cuenta debido al avance de la electrónica y la ciencia.

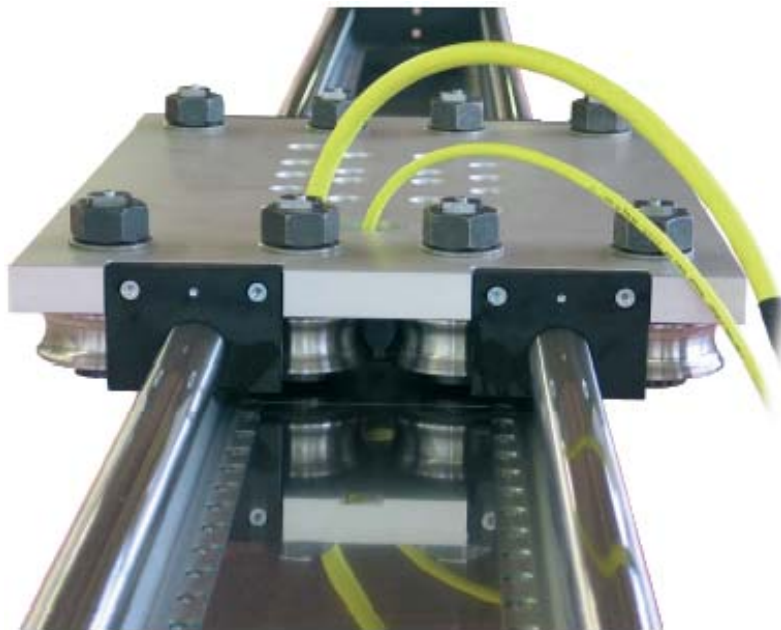


Figura 4.1 - Motor lineal SAIN serie LMS

Hoy en día es posible aventurarse a desarrollar una aplicación directa al usuario, en virtud de que los motores lineales de la misma proporción de tamaño, no poseen la misma fuerza que un actuador neumático o hidráulico, ya que tienen grandes ventajas como la de ser extraordinariamente versátiles. Los motores lineales son de diseño

compacto; sólo constan de un estator y un deslizador; se les puede controlar libremente su movimiento; y ahora, encajan perfectamente con los conceptos actuales de control. Además, de que su costo tiende a disminuir y los sistemas y mecanismos modernos, requieren de mayor velocidad, confiabilidad y precisión

## ¿QUÉ ES UN MOTOR LINEAL?

### ¿QUÉ ES UN MOTOR LINEAL?

Los motores lineales representan una alternativa a los motores rotativos y a veces una solución única en las aplicaciones donde se precisa una dinámica muy alta. El motor lineal permite aceleraciones hasta  $475 \text{ m/s}^2$  y una velocidad lineal máxima de hasta  $20 \text{ m/s}$ . Si se le añade un sistema de medición lineal se puede asegurar una alta precisión de posicionamiento y repetitividad. La ausencia de los elementos de transmisión convencionales como la cremallera, el husillo, la correa dentada, el reductor y el acoplamiento aumentan la fiabilidad y vida útil de todo el conjunto. Se reducen al mínimo las dimensiones y el peso.

La mejor forma de entender lo que es un motor lineal, se logra al visualizar el corte y desenrollo de un motor normal rotatorio de inducción, como se muestra en la figura siguiente (fig 5.2). En ella, observamos el corte transversal de un motor convencional de inducción con rotor jaula de ardilla. Los conductores primarios están embebidos en el núcleo del estator y los conductores secundarios del rotor en el núcleo de éste. El entrehierro está cerrado sobre sí mismo.

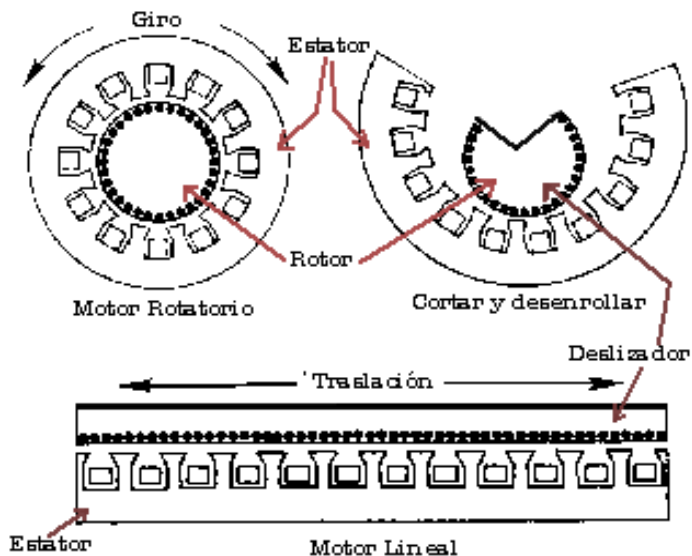


Figura 4.2 - Motor convencional de inducción de rotor de jaula desenrollado para obtener un motor lineal de inducción.

Si nosotros cortamos la parte superior del estator de un motor de inducción y lo desenrollamos hasta que quede completamente horizontal como se muestra en la figura anterior, obtendremos un motor de inducción lineal de lado sencillo.

Si ahora en vez de cortar el estator del motor rotatorio, lo partimos en dos partes iguales (fig. 5.3a) y lo aplastamos como se muestra en la figura siguiente (fig.5.3b), obtenemos el estator de un motor lineal horizontal de doble cara (fig. 5.3c). Si ponemos una placa metálica entre las mitades del estator, obtendremos un motor de inducción lineal de doble cara (fig. 5.3d).

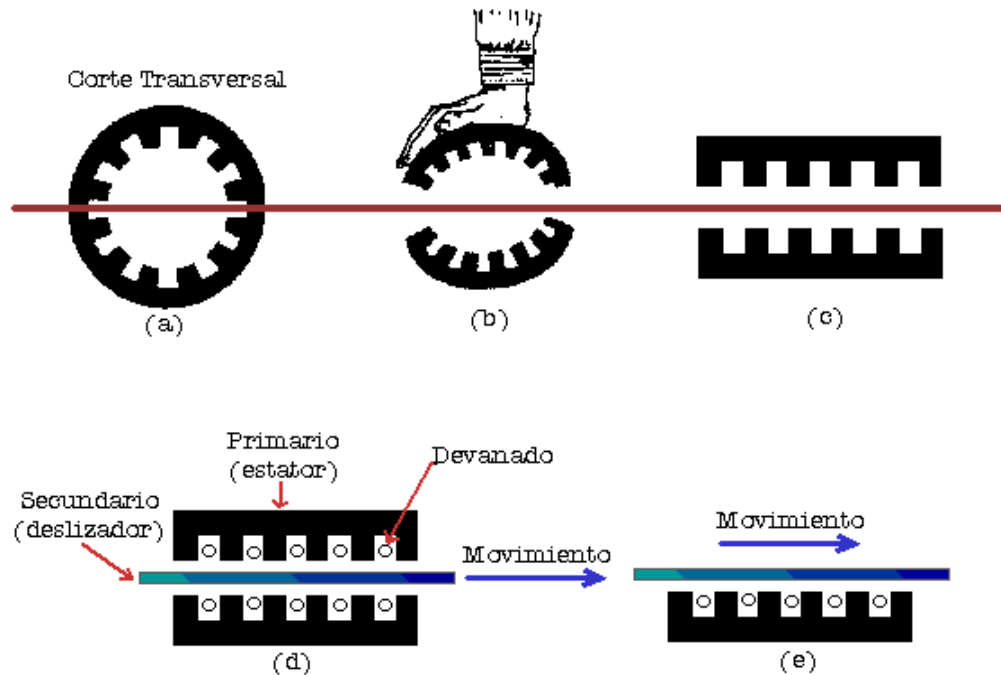


Figura 4.3 - Aquí se explica en forma didáctica la construcción de un motor lineal. Primero hay que cortar el rotor de un motor convencional en dos partes (a); después hay que aplastar las dos partes (b); enseguida obtenemos el estator del motor lineal (c); Le agregamos una placa conductora que será la que se mueva y obtenemos un motor lineal de doble cara (d); y si le quitamos una armadura nos queda un motor lineal de una sola cara (e)

Al igual que en los motores rotatorios, identificamos las dos partes del motor lineal como primario y secundario. Pero no por esto siempre corresponde al estator y al deslizador respectivamente. El miembro primario de un motor lineal recibe la potencia de la fuente, pero en algunas ocasiones, el miembro primario puede ser el que se mueva, por lo tanto, sería como el rotor de un motor rotatorio. En la mayoría de los casos, el primario es el miembro estacionario y el secundario, es el que se mueve con respecto al primario, y eso es lo que conforma un motor lineal.

**LAS PARTES DE UN MOTOR LINEAL**

En contraste con la terminología de los motores rotatorios, a la parte que se mueve en un motor lineal, no se le designa como rotor, sino que se le llama deslizador o *forcer* en inglés. Al núcleo magnético del rotor se le puede considerar ahora, como banda magnética y a los conductores secundarios del rotor, como banda conductora.

A continuación tenemos un esquema explicando cada parte del motor en tercera dimensión (fig. 5.4).

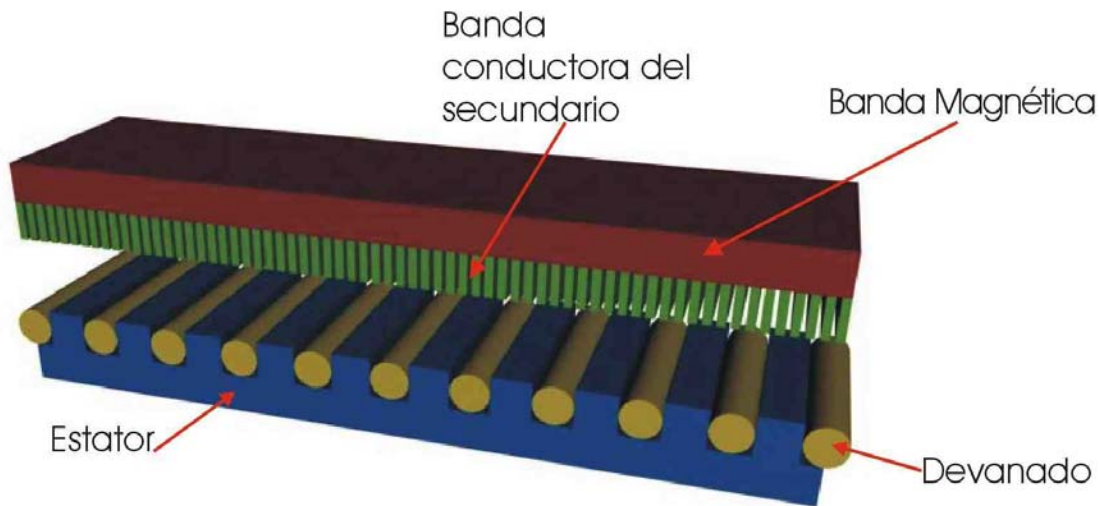


Figura 4.4 - Partes de un motor lineal de inducción

Cabe aclarar que un motor lineal no puede tener las dimensiones que se ponen en el esquema anterior. Debido a que un motor lineal debe de tener una parte más larga que la otra para que pueda moverse a lo largo de su contraparte. Por tanto, en realidad, podemos clasificar los motores lineales, en tres configuraciones diferentes, de acuerdo a las dimensiones de las partes que lo integran.

TIPOS DE CONFIGURACIONES DE LOS MOTORES LINEALES

**PRIMARIO CORTO MOVIBLE:** En la figura siguiente (fig. 5.5) se muestra una forma común de motor lineal de inducción con un primario corto y una lámina de secundario conductiva relativamente larga. En este motor lineal de inducción, de primario corto y un solo lado (una sola cara). El secundario es estacionario y el primario es capaz de moverse. En

este modo, se usa el motor lineal de inducción de una sola cara para mover el secundario a distancias grandes, debido a que sería demasiado caro construir un devanado primario en toda la longitud. Como el secundario es estacionario, las corrientes estacionarias inducidas producen un flujo magnético que reacciona contra el flujo magnético del primario para impulsarlo a lo largo de la banda conductiva. Este diseño se usa típicamente en grúas, en donde se dispone de corriente trifásica y donde el secundario consiste en una viga de acero con alma tipo "I"

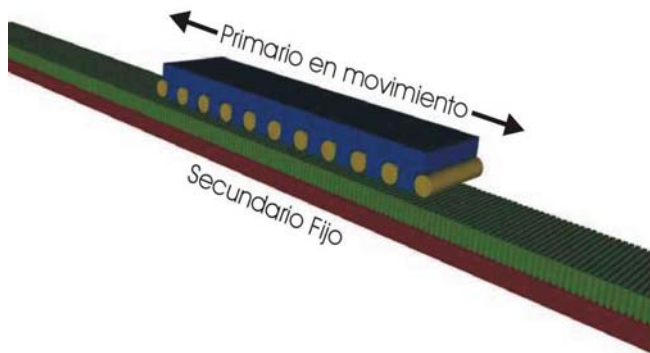


Figura 4.5 - Esquema de movimiento de un motor lineal con primario corto y móvil.

**PRIMARIO CORTO FIJO:** Está configuración es exactamente igual que la anterior, con la salvedad de que fijamos el primario y ahora el que se mueve es el secundario(ver Figura 4.6). El secundario puede ser una placa conductora, o bien, una banda flexible conductora. Esta configuración es utilizada comúnmente para mover cosas, a través de una banda transportadora conductora.

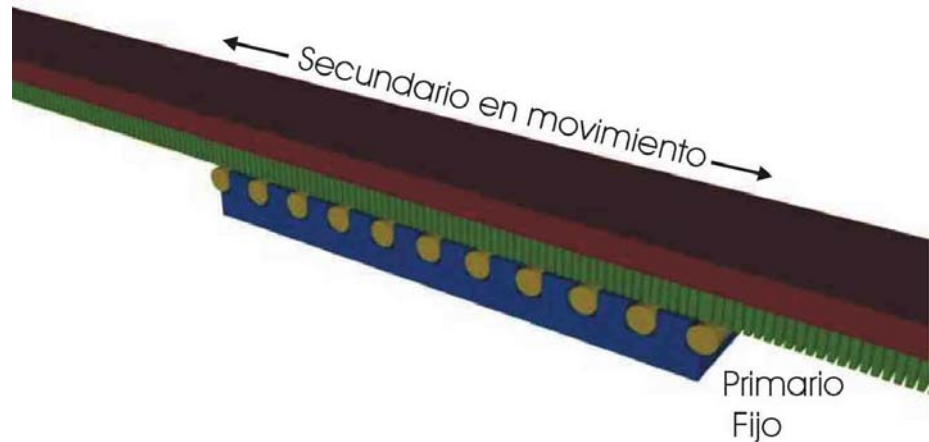


Figura 4.6 - Esquema de movimiento de un motor lineal con primario corto y fijo.

**SECUNDARIO CORTO MOVIBLE:** En el siguiente esquema (fig.5.7) se muestra el motor lineal de inducción con el secundario corto de una sola cara. Este tipo de motor es adecuado para distancias limitadas, pero desarrolla fuerzas de empuje relativamente altas.

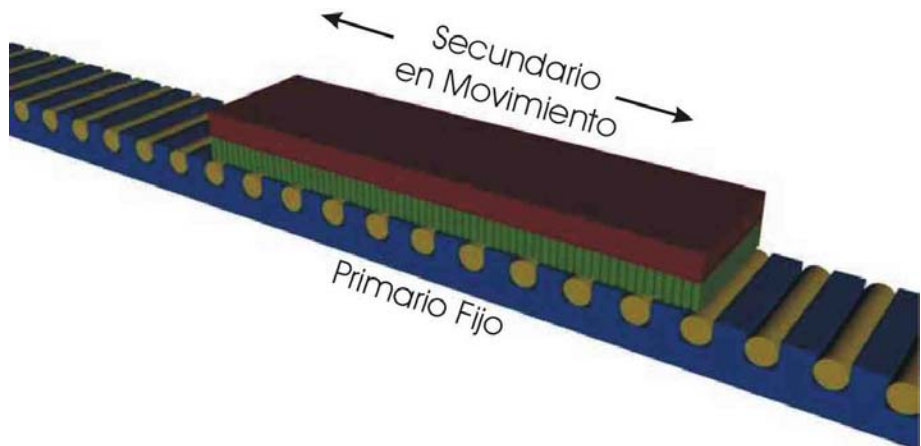


Figura 4.7 - Esquema de movimiento de un motor lineal con secundario corto y móvil

Ahora que ya conocemos las tres configuraciones comúnmente existentes en la vida real, te estarás preguntando ¿por qué no existe una cuarta configuración Secundario corto y fijo? la respuesta es muy simple. No es una buena configuración, porque no es energéticamente viable, ya que estaríamos consumiendo más energía de la conveniente.

A continuación, se muestra una tabla con las configuraciones existentes, sus carreras, fuerza, eficiencia, y costo

CONFIGURACIÓN	CARRERA	FUERZA	EFICIENCIA	COSTO
PRIMARIO CORTO MOVIBLE	Largas	Moderada	Moderada	Bajo
PRIMARIO CORTO FIJO	Largas	Moderada	Alta	Bajo
SECUNDARIO CORTO MOVIBLE	Cortas	Altas	Alta	Alto

**VELOCIDAD DE UN MOTOR LINEAL** A todas estas configuraciones, se le puede añadir un primario más, para tener motores de doble cara, que aportan un circuito magnético más definido. En todos los casos, ya sea que el primario esté estacionado o que se mueva, se puede calcular la velocidad del *extremo lineal* del flujo llano que produce el primario, con la siguiente fórmula:

VELOCIDAD EXTREMO LINEAL

$$v_e = \frac{\omega \tau_e}{\pi} = v_s \frac{\tau_e}{\tau} = 2f\tau_e \text{ (m/s)}$$

Donde:

- $\omega$  = Velocidad angular en radianes por segundo ( $2\pi f$ )
- $v_e$  = Velocidad de la onda de efecto extremo en m/s
- $v_s$  = Velocidad lineal síncrona en metros por segundo
- $f$  = Es la frecuencia en Hertz
- $\tau_e$  = Es el paso polar (media longitud de onda), o sea, la distancia entre los polos adyacentes en metros, de las ondas de efecto extremo
- $\tau$  = Es el paso polar de la onda de velocidad síncrona

**VELOCIDAD SÍNCRONA** Despejando de la ecuación anterior obtenemos la velocidad lineal síncrona:

$$v_s = 2f\tau$$

**VELOCIDAD REAL** La velocidad síncrona del motor lineal se calcula con la igualdad anterior. Pero si lo aplicamos a un motor lineal de inducción que tiene un deslizamiento intrínseco. Podemos calcular la velocidad real del motor lineal de inducción, con la relación siguiente:

$$v = v_s (1 - s)$$

Donde “v” es la velocidad real del motor y “s” es el factor de deslizamiento. Si sustituimos la velocidad síncrona del motor lineal de inducción en la ecuación anterior, obtenemos:

$$v = 2f\tau(1 - s)$$

Y esta relación, es análoga a la ecuación para el motor de inducción rotacional de jaula de ardilla, que se muestra a continuación:

$$S_r = 120\left(\frac{f}{P}\right)(1 - s)$$

Donde:

- S<sub>r</sub> = Velocidad del rotor en rpm
- S = Velocidad síncrona (120 f /P) en rpm del campo magnético rotatorio producida por el estator
- s = Factor de deslizamiento

## EL MOTOR LINEAL TUBULAR

Enseguida, vamos a mostrar otro tipo llamado “Motor Lineal Tubular”. Que aunque utiliza el mismo principio que los demás, éste no puede tener doble primario y varía también, en su forma geométrica. Para fines de esta tesis, no nos es útil este tipo de motor, sin embargo, por su valor como conocimiento general de los motores lineales, vamos a describir brevemente su construcción.

Una vez hecho el experimento teórico de cortar y desenrollar el estator de un motor rotatorio, se abren más posibilidades para modificar los circuitos magnéticos y eléctricos del motor. Si el estator es “desenrollado” para formar un motor lineal y después es vuelto a enrollar en la dirección del movimiento, obtendremos el motor tubular de la figura siguiente:

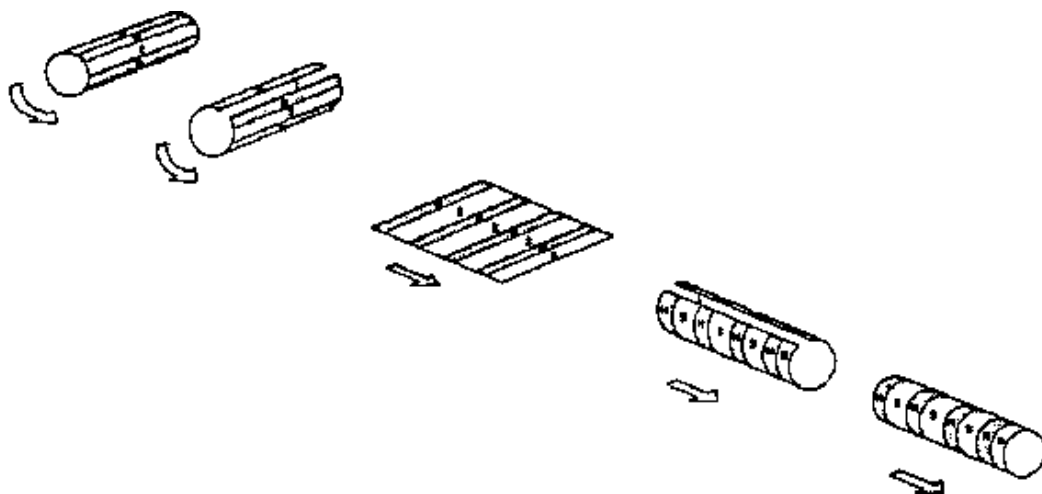


Figura 4.8 - Construcción imaginaria de un motor lineal tubular

Podemos observar como simplemente el devanado de una estructura de un motor tubular puede ser ensamblado por fuera (ver Figura 4.9). En la práctica, las bobinas primero son devanadas individualmente, posteriormente se montan en el tubo, y finalmente son interconectadas en forma predeterminada.

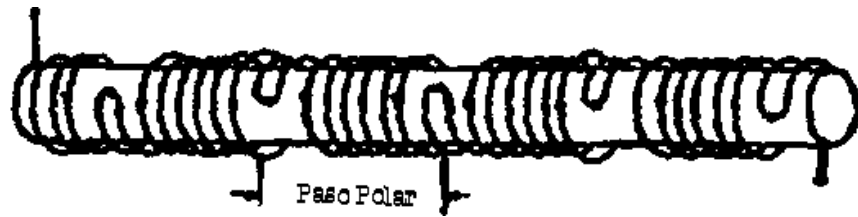


Figura 4.9 - Construcción de los devanados en un motor lineal tubular



Figura 4.10 - Fotografía de un motor tubular

En un motor rotatorio convencional también se devanan primero las bobinas y cuando se ha colocado el aislamiento entre ranuras se colocan e interconectan las bobinas para formar el devanado del estator. Una característica especial del devanado de un motor tubular es que no tiene ningún cabezal conectado.

## DIFERENCIAS ENTRE MOTORES LINEALES Y ROTACIONALES

La mayor diferencia es el hecho de que un motor lineal tiene un principio y un final en la dirección del movimiento, lo cual no se puede considerar en un motor rotatorio. Esta característica produce el efecto de punta que influencía adversamente en el funcionamiento del motor. En aplicaciones de baja velocidad, la influencia del efecto punta es insignificante, pero en aplicaciones de alta velocidad debe tenerse en cuenta siempre este fenómeno.

Otras diferencias entre un motor rotatorio y un motor lineal, es el entrehierro relativamente grande el cual es inherente en la construcción de un motor lineal. El entrehierro en un motor rotatorio debe ser tan pequeño como sea posible para obtener un buen circuito magnético.

Un entrehierro grande produce un efecto indeseable en el funcionamiento de los motores lineales. En la siguiente figura (fig.5.11) se muestran las curvas de empuje contra deslizamiento para tres entrehierros distintos en newtons. El motor que se usó para estos datos es uno lineal de inducción de doble cara, baja velocidad, con una frecuencia de 50Hz.

Un secundario de cuatro polos de aluminio de 5mm de espesor y una densidad de corriente de 500A/cm y que tiene una velocidad síncrona igual a 9m/s. La figura muestra que a medida que aumenta el espesor del entrehierro, disminuye el empuje y aumenta un poco el deslizamiento al cual se presenta el empuje máximo.



También muestran las curvas un empuje pequeño a deslizamiento cero debido a la onda de efecto de entrada por los extremos. Esta diferencia entre motores de inducción jaula de ardilla y de inducción lineales se debe esencialmente a las diferencias de sus entrehierros.

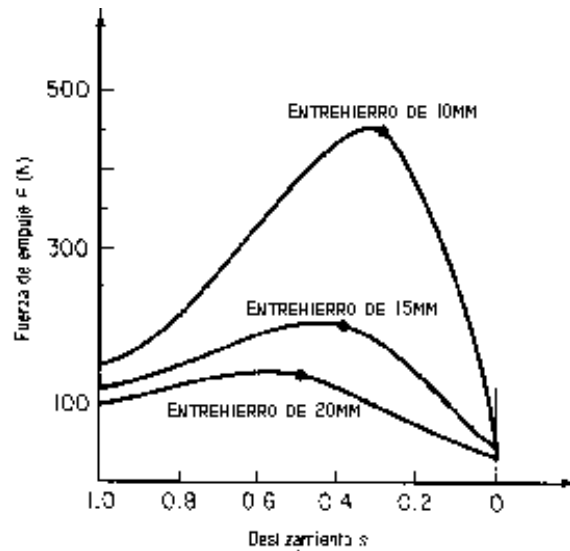


Figura 4.11 - Empuje en función de deslizamiento para diversos entrehierros

La tercera diferencia es que la mayoría de los motores lineales de inducción no tienen barras o bobinas conductoras como su equivalente rotatorio en el rotor. El miembro en movimiento en un motor lineal, por lo regular es una placa conductora sólida o laminada

Otra característica de los motores lineales no común en los motores rotatorios es que el secundario o rotor, invariablemente es más ancho que el núcleo del primario. Esta característica de los motores lineales, especialmente de los motores lineales de inducción, resultan en efectos de punta transversales, lo que afecta significativamente el funcionamiento del motor.

Finalmente, una fuerza perpendicular a la dirección del movimiento existe en los motores lineales de cara sencilla. Esta fuerza llamada "Fuerza Normal" puede ser de atracción o de repulsión. Las fuerzas normales en un motor rotatorio se balancean fuera del motor, sobre su superficie al rededor del entrehierro. A menos que el rotor este **excéntrico**, un motor rotatorio no tiene una fuerza normal o radial neta. La figura siguiente muestra un motor de inducción lineal síncrono y una de sus aplicaciones en el movimiento de vigas grandes. Y en esta figura se muestran algunas de las características mencionadas anteriormente. Y en los que se hace notar la existencia de los efectos de punta producidos por los extremos. El entrehierro relativamente grande introducido por la naturaleza de la aplicación. El secundario más ancho que el núcleo del primario resultando ello en efecto de punta transversales y finalmente la presencia de una fuerza normal de atracción.

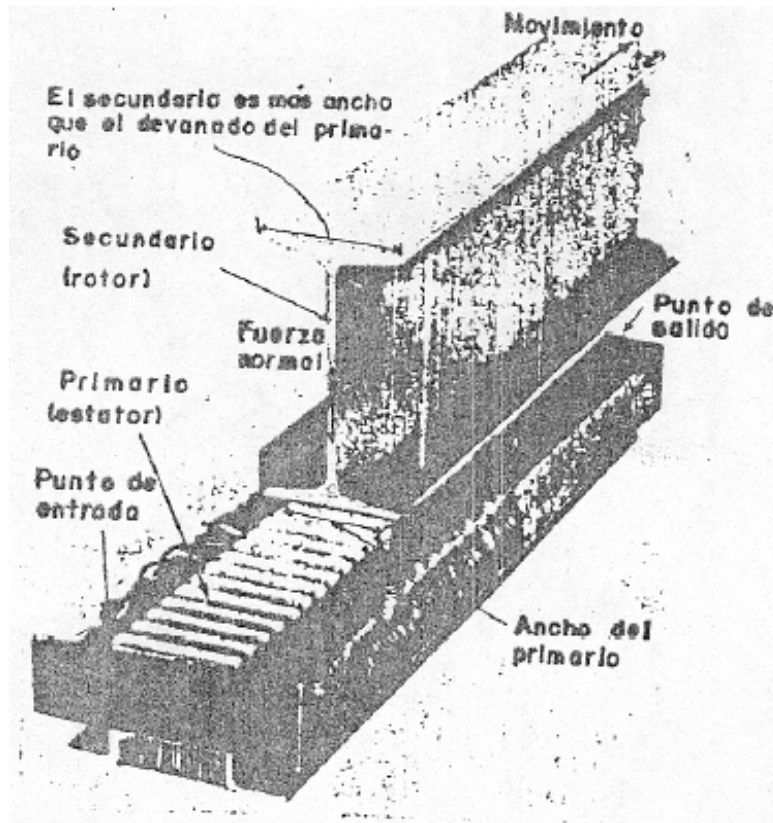


Figura 4.12 - En esta figura se hace notar la existencia de los efectos de punta producidos por los extremos. El entrehierro relativamente grande. El secundario más ancho que el núcleo del primario resultando ello en efecto de punta transversales y la presencia de una fuerza normal de atracción.

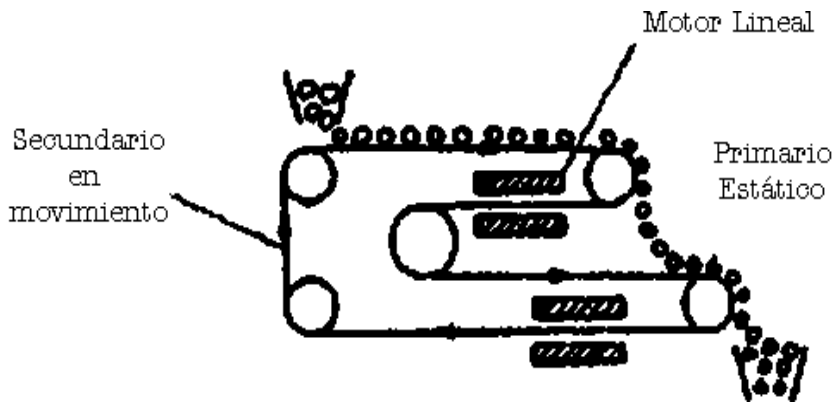


Figura 4.13 - Aplicación de dos motores lineales para una banda transportadora conductora

En la práctica la mayor limitación sobre el funcionamiento y aplicaciones de los motores lineales es que deben tener un entrehierro de dimensiones grandes, además, en muchos casos, especialmente en motores muy largos es muy difícil mantener un entrehierro

uniforme en todo el largo del motor. Otra limitación es impuesta por la longitud que recorrerá el miembro en movimiento del motor lineal. Por ejemplo en un sistema transportador como el de la figura de la izquierda (fig.5.13) formado por una banda de trayectoria cerrada en el secundario. La fabricación de dicha banda conductora es muy difícil.

Si consideramos que los motores lineales pueden encontrar muchas aplicaciones requiriendo una longitud limitada de viaje podríamos adelantar que los motores lineales también se pueden aplicar en baja o media velocidad y en sistemas de transportación terrestre a alta velocidad. Algunos de los usos más prometedores de los motores lineales son como actuadores de equipo automático, como en el caso de máquinas de control numérico, manejo de equipo y como transportadores. Con los avances de los superconductores, electrónica digital y polos permanentes de alto voltaje, los motores lineales están a la expectativa de encontrar novedosas aplicaciones.

## **VENTAJAS DE LOS MOTORES LINEALES SOBRE LOS ROTATORIOS**

### **VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS MOTORES LINEALES SOBRE LOS ROTATORIOS**

Los motores lineales tienen aplicaciones ilimitadas como sistemas de transportación; manejo y almacenamiento de materiales; movimiento de personas; bombeo de metales líquidos; aceleradores y lanzadores; operación de máquinas herramientas; manejo de equipaje en los aeropuertos; apertura y cierre de guardarrropas; operación de puertas corredizas; trenes de alta y baja velocidad; entre otras.

En las aplicaciones comunes de hoy en día, en que se requiere un movimiento de forma lineal se usan motores rotatorios con convertidores de movimiento rotacional a movimiento lineal. Y esto genera una mayor probabilidad de falla, mayor cantidad de ruido y desgaste. Teniendo en cuenta estos aspectos podemos afirmar que un motor lineal es más confiable y robusto debido a que carece de engranes y el equipo encargado de transformar el movimiento rotatorio a movimiento lineal.

- T Son extraordinariamente versátiles
- T Se puede controlar y regular libremente su movimiento
- T Pueden ser integrados perfectamente en las aplicaciones usando los conceptos modernos de control.
- T Menor fricción y no reacción inversa (“backlash”) lo que resulta en un alta precisión.
- T No tiene limitaciones mecánicas en la aceleración y velocidad; éstas son solo limitadas por el ancho de banda del sistema que mide la posición (usualmente un codificador) y por la potencia electrónica.
- T Alta confiabilidad y larga vida, debido que no tiene partes mecánicas y su contacto es mínimo o inexistente.
- T Habilidad para ejercer el empuje sobre el elemento móvil sin contacto físico (mecánicos). Así como un control conveniente de empuje.

- T La existencia de una fuerza normal, lo cual es una ventaja para las máquinas de levitación.
- T Alta aceleración, desaceleración y menor desgaste en las ruedas y en las vías donde tiene lugar al aceleración y desaceleración
- T Protección mecánica, eléctrica y la destreza de contrarrestar un medio ambiente hostil
- T Son de diseño compacto, sólo constan de un estator y un deslizador

Para poder elegir una buena aplicación para los motores lineales, aparte de considerar las ventajas también hay que considerar sus desventajas que son las siguientes:

- X Tienen una baja eficiencia debida a su gran entrehierro
- X Efecto punta, ocasionado por que el estator, a diferencia de los motores rotacionales, tiene un principio y fin, es decir una terminación del campo magnético. Este reduce el máximo empuje que el motor puede producir. El efecto de las puntas solo se presenta en los motores lineales y es casi despreciable a baja velocidad alta velocidad es significativo.

## CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES LINEALES

### CLASIFICACIÓN DE ACUERDO A LA DIRECCIÓN DEL FLUJO MAGNÉTICO

## CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES LINEALES

Todos los motores tienen una interacción entre sus flujos magnéticos y el movimiento que generan. Esto se establece de acuerdo a la configuración geométrica de los bobinados y a la dirección de movimiento que generen. Por esa razón existe una clasificación de acuerdo a la dirección del flujo magnético y de la dirección del movimiento. Tales motores pueden ser de dos tipos:

**MOTORES DE FLUJO LONGITUDINAL:** Los circuitos electromagnéticos pueden ser modificados de tal forma que la trayectoria del flujo este en un plano perpendicular a la dirección del movimiento resultando en un motor de flujo transversal.

**MOTORES DE FLUJO TRANSVERSAL:** De la misma forma en que se pueden modificar los circuitos electromagnéticos para tener un flujo longitudinal también pueden modificarse para tener un flujo transversal con respecto a la dirección del movimiento.

**CLASIFICACIÓN DE ACUERDO A SU PRINCIPIO DE OPERACIÓN** Para cada motor rotatorio existe una contraparte de movimiento lineal. Aunque lo opuesto de este caso no siempre es verdadero. Así el análogo del motor rotatorio de CD es el motor lineal de CD, del motor de inducción rotatorio es el motor de inducción lineal, del motor síncrono rotatorio es el motor síncrono lineal. Y de esa misma forma tenemos los análogos de los motores a pasos, motores de reluctancia, etc. En el esquema de la Figura 4.14 se muestra la clasificación de los motores rotatorios y lineales. Y donde se enfatiza que para cada tipo hay un análogo en el mundo de los motores lineales.

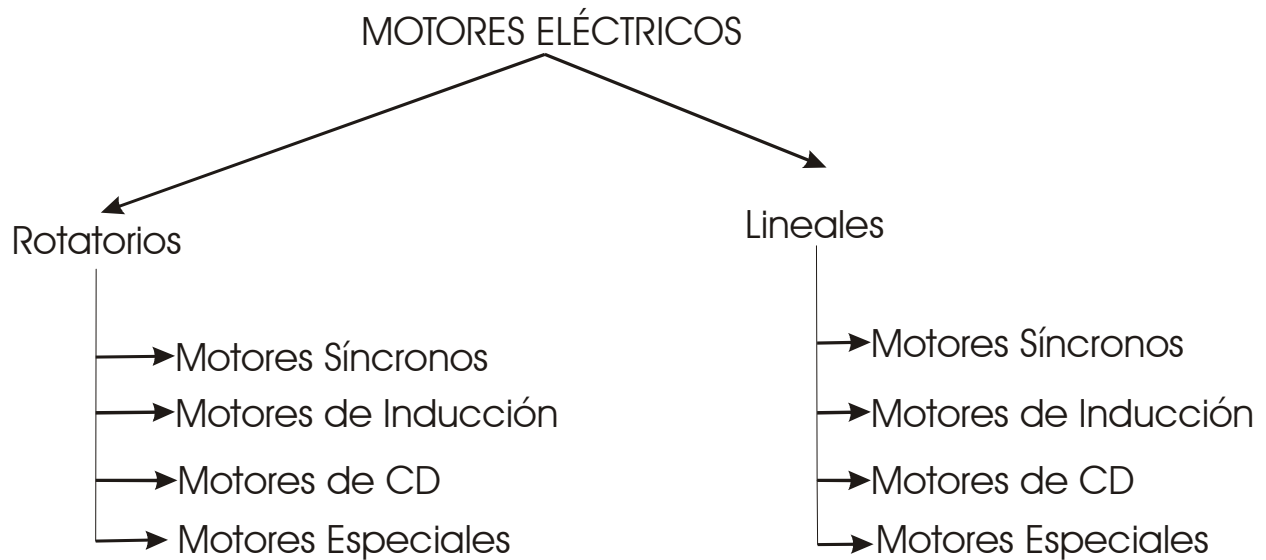


Figura 4.14 - Clasificación de los motores eléctricos.

Ahora vamos a dar una breve descripción de cada uno de los tipos de motores lineales, puesto que los motores rotatorios no son de interés en este capítulo. Comenzaremos con el primero que se menciona en el esquema anterior.

### MOTORES SÍNCRONOS LINEALES

### MOTORES SÍNCRONOS LINEALES

Los motores síncronos lineales operan con el principio similar al que su contraparte rotatorio. El motor síncrono lineal viene desarrollándose en la última década como un aparato de propulsión terrestre a alta velocidad. Como un motor síncrono convencional, el motor lineal tiene una excitación polifásica de la armadura y un campo excitado con CD. La excitación del campo puede ser del tipo convencional (Figura 4.15) o puede ser provista por polos permanentes. La (figura 3.4) muestra el desarrollo de un motor de polos permanentes.

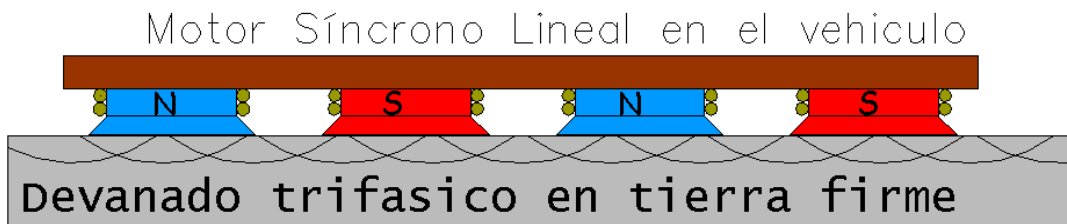


Figura 4.15 - La excitación de campo de un motor síncrono lineal puede ser del tipo convencional

El motor síncrono lineal (MSL) es bastante semejante al motor de CD sin escobillas, con la excepción de que la armadura de CD se substituye con un

devanado trifásico excitado desde una fuente trifásica (ver figura 5.15). Los devanados de campo de polos salientes se excitan con una fuente de CD en el vehiculo en movimiento. Se produce un flujo lineal de barrido en el estator estacionario, que es semejante en su diseño y construcción al de un motor lineal de inducción. Dado que el flujo del estator se mueve a la velocidad síncrona, los polos salientes están trabados en sincronismo con él, haciendo que el vehiculo se mueva también a la velocidad síncrona

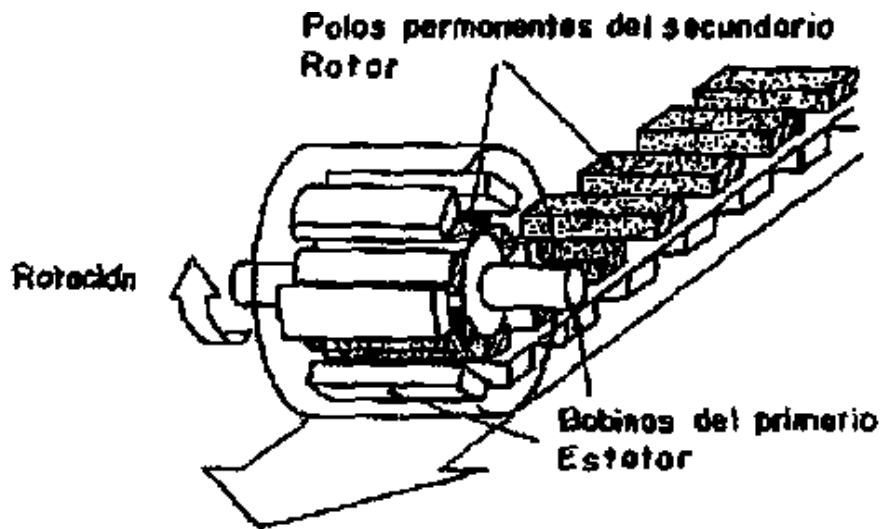


Figura 4.16 - Motor síncrono lineal de polos permanentes en el secundario

Debido a su alta velocidad, que esencialmente es función de la frecuencia, Los MSL de campo excitado no son tan comunes, por lo que han sido desarrollados solamente en tamaños muy grandes para transportación terrestre a alta velocidad como motor de propulsión. En años recientes, se ha concentrado la experimentación en el desarrollo de devanados superconductores de campo en los polos salientes.

## MOTOR HOMOPOLAR SÍNCRONO LINEAL

### MOTOR HOMOPOLAR SÍNCRONO LINEAL

Otro tipo de motor síncrono lineal es el motor homopolar síncrono lineal (LSHM). Este motor pertenece a los motores lineales síncronos. Recibe excitación tanto de CD como polifásica de CA en un núcleo fijo y común en forma de U (ver figuras siguientes). El núcleo secundario móvil no contiene devanados. Sus polos se producen por medio de una barra de distribución de CD como se ve en la Figura 4.17a. Ya que todos los polos salientes en el núcleo secundario son de la misma polaridad (norte), el paso polar del secundario es el doble del que produce el devanado primario trifásico (ver Figura 4.17b). Como todos los motores síncronos rotatorios, el síncrono y el homopolar síncrono se deben de llevar a la velocidad síncrona antes de aplicar la corriente directa a los polos a los polos de campo. Una vez que estos están energizados, las características operacionales del motor síncrono y del homopolar síncrono son idénticas.

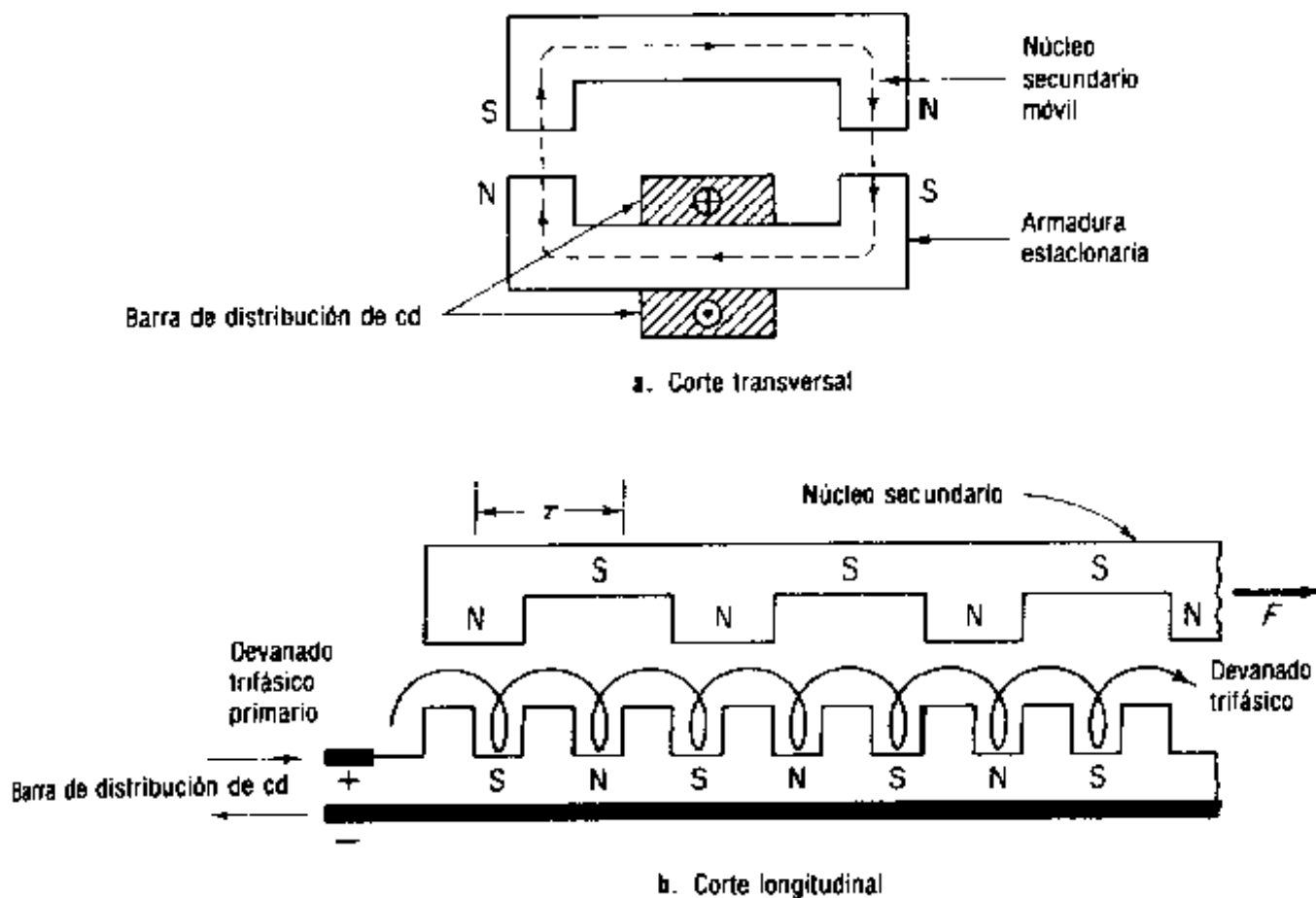


Figura 4.17 - Esquema de un motor homopolar lineal síncrono

*MOTOR DE  
RELUCTANCIA  
LINEAL*

*MOTOR DE RELUCTANCIA LINEAL*

Otra variedad del MSL son los motores de reluctancia lineal (MRL), para entender mejor a estos motores vamos a describir su funcionamiento basandonos en el homologo rotatorio.

El principio de funcionamiento del motor de reluctancia conmutado, que en muchas publicaciones de habla inglesa aparece bajo el nombre de „Switched- Reluctance- Motor“, es fácilmente imaginable: Un eje de hierro que puede girar apoyado sobre unos rodamientos, o también los dientes de un rotor de hierro, se orientan en un campo magnético producido gracias a una corriente eléctrica en los polos del estator. Mediante una determinada conmutación del campo magnético se conseguirá un movimiento rotatorio del núcleo de hierro. En el caso de que este rotor posea mas dientes, se puede comparar su forma a la de una rueda dentada de gran espesor. El concepto „Reluctancia“ se corresponde con la resistencia magnética, la cual opone dicho rotor al campo electromagnético. La generación y posterior conmutación del campo magnético se realiza en los bobinados de los polos de la parte fija de la máquina, a través de la electrónica de potencia conectada al motor. Con la electrónica de potencia, mediante la cual nos referimos al convertidor de corriente así como al convertidor de frecuencia, se pueden influir de la manera deseada tanto en las revoluciones como en el par de giro del motor. Los motores de reluctancia conmutados permiten ser realizados desde los accionamientos más pequeños hasta los grandes motores.

Ahora bien, a diferencia de su homologo rotatorio, el motor lineal de reluctancia no tiene devanado de campo. El devanado primario ubicado en la estructura en movimiento, como se observa en la figura siguiente. Este motor puede ser polifásico o monofásico.

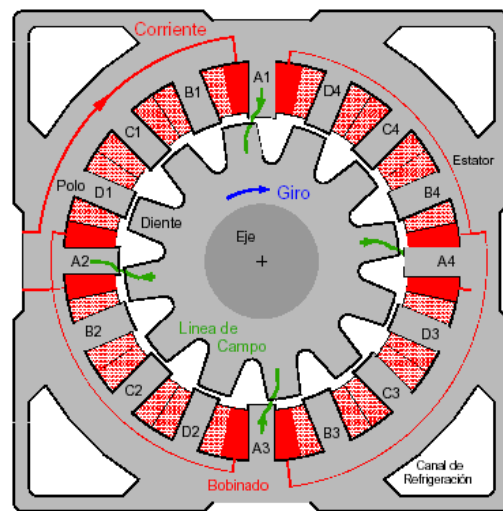


Figura 4.18 - Corte transversal de un motor de reluctancia conmutada



Los rieles magnéticos fijos y con muescas dan la prominencia necesaria de polos para producir el par de reluctancia requerido, como resultado de barrido que produce el devanado primario que está en el vehículo móvil. Como el caso de su homólogo rotatorio, el motor lineal de reluctancia tiene par de reluctancia, tanto de arranque como de marcha, que es pequeño en comparación con los lineales de inductancia y los lineales síncronos. Son muchas las posibles configuraciones de los MRL,

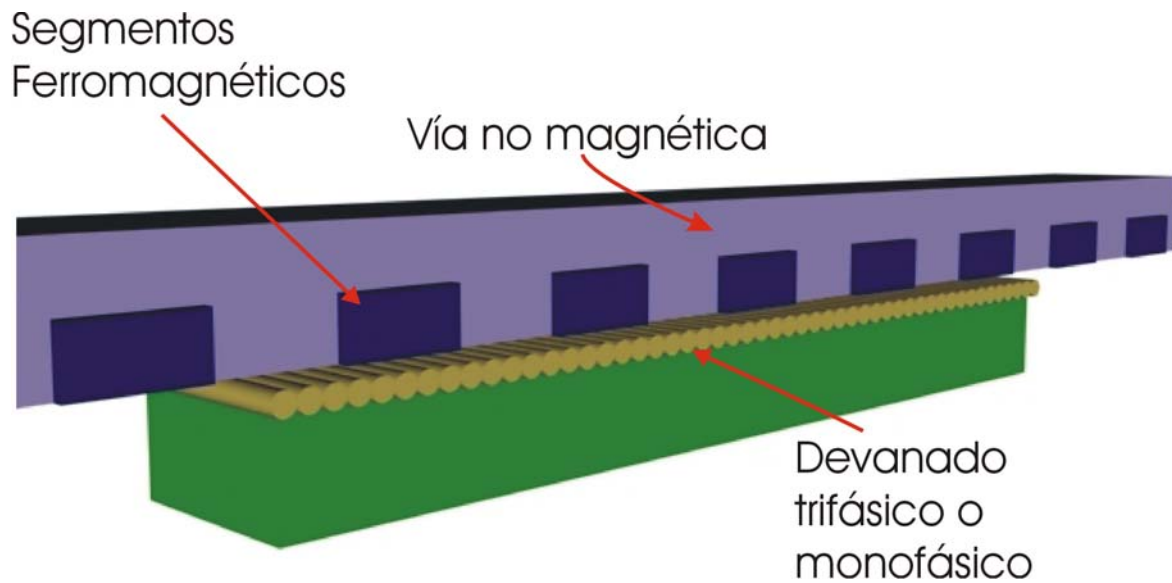


Figura 4.19 - Esquema de un motor síncrono lineal de reluctancia

A continuación damos por culminada la descripción de los tipos más importantes de los motores síncronos lineales, mostrando a continuación un diagrama de la clasificación de los motores síncronos lineales .

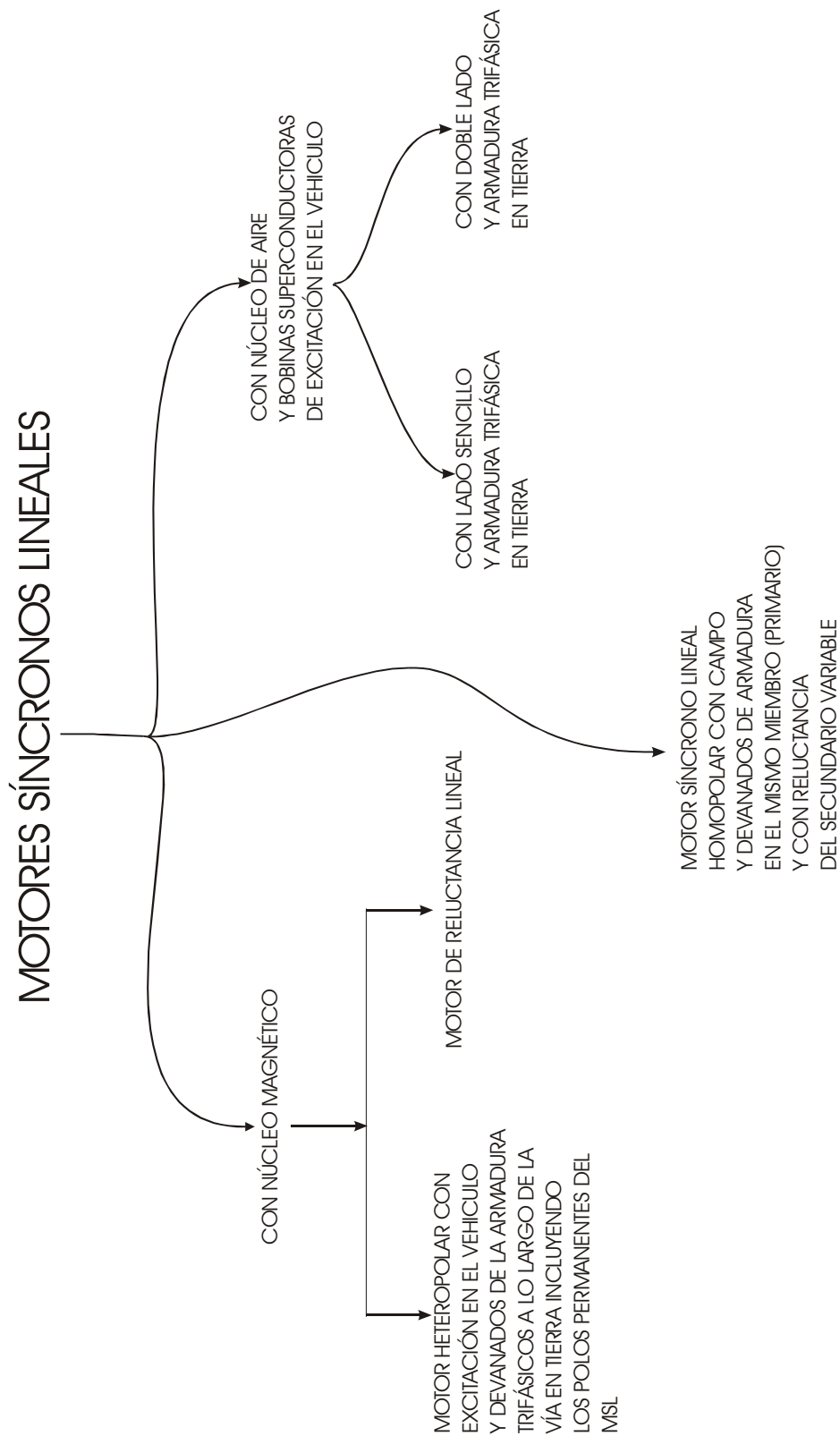


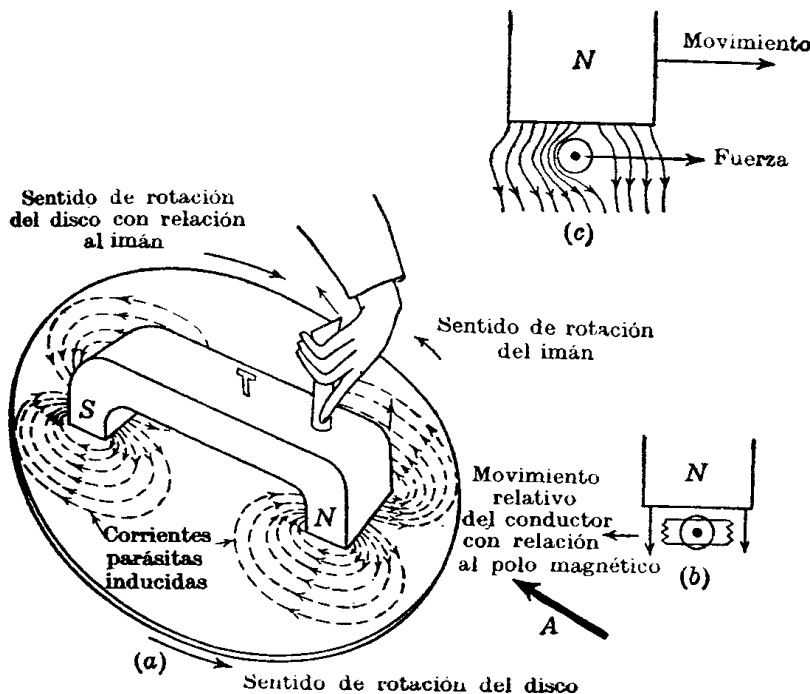
Figura 4.20 - Clasificación de los motores síncronos lineales. Esquema obtenido de la tesis de motores lineales de ESIME Zacatenco

## MOTORES LINEALES DE INDUCCIÓN

### MOTORES LINEALES DE INDUCCIÓN

El motor de inducción es el motor de corriente alterna que más se emplea, debido a su fortaleza y simplicidad por la ausencia de colector y al hecho de que sus características de funcionamiento se adaptan bien a una marca a velocidad constante.

Para explicar el principio del motor de inducción vamos a imaginar un dispositivo como el que se muestra en la figura siguiente: (figura 5.21a). El disco de metal que se ilustra puede girar libremente alrededor de un eje vertical.



El disco puede ser de cualquier material conductor. El imán también puede girar libremente sobre el mismo eje que el disco y además el imán debe estar dispuesto encima del disco. El imán tiene la característica de que sus extremos están curvados hacia abajo para que su flujo magnético corte el disco. Cuando el imán gira, las líneas magnéticas cortan el disco e inducen corrientes parásitas en él.

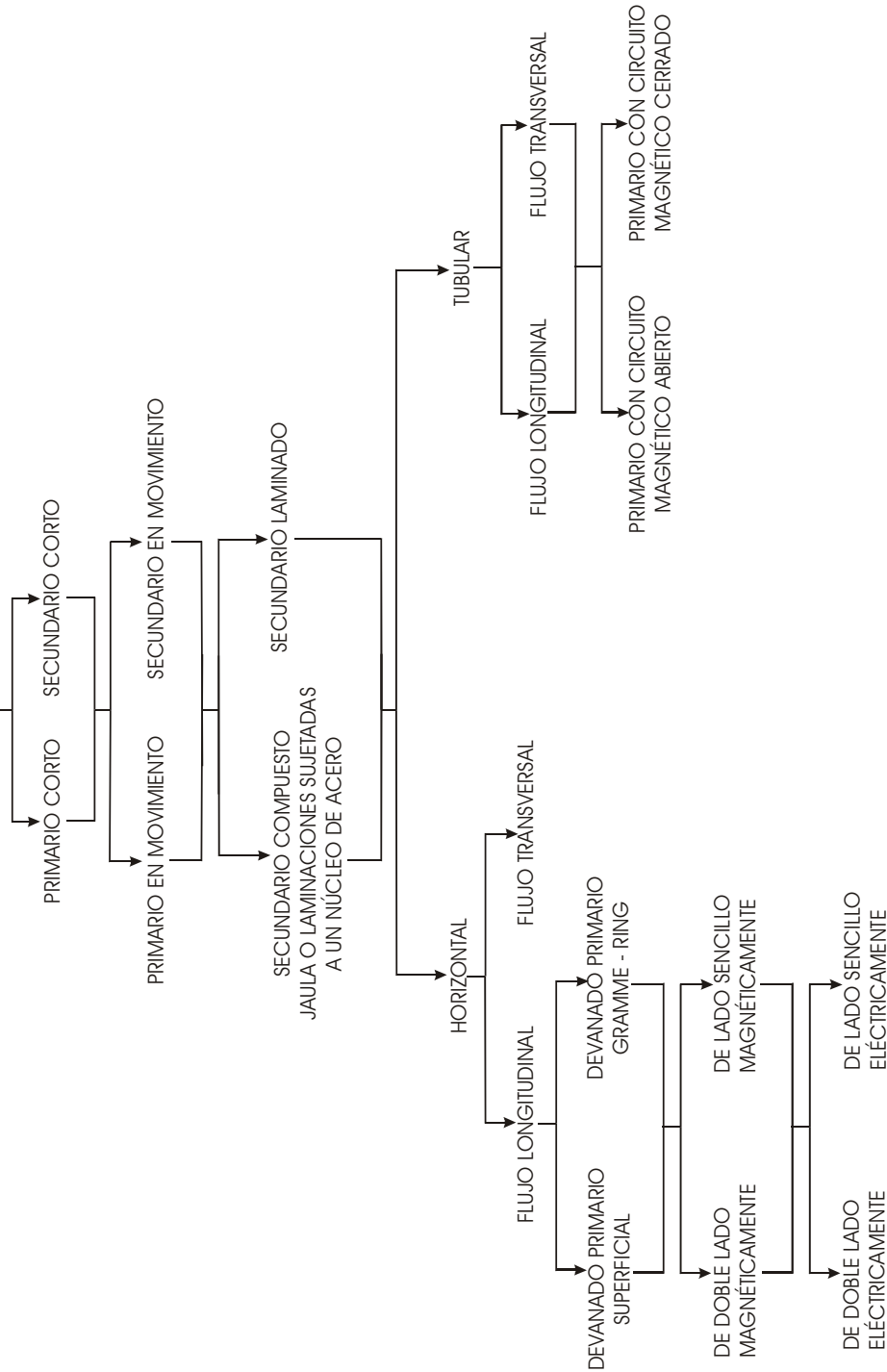
Como estas corrientes se encuentran también en un campo magnético, tienden a moverse en él igual que las corrientes en los conductores de un motor de

Figura 4.21 - Principio de funcionamiento de un motor de inducción

corriente continua. Según la ley de Lenz, la dirección de la fuerza desarrollada entre las corrientes del disco y el campo magnético que las produce será tal que el disco tiende a seguir el imán en su rotación.

En realidad el imán gira en un sentido y el disco gira en el mismo sentido pero a menor velocidad. Así en un motor de inducción se produce un acción generadora y una acción motriz que obliga a las corrientes inducidas a seguir el campo inductor. El rotor o deslizador en un motor de inducción nunca va a poder alcanzar al campo magnético del estator, por que si llegara a alcanzarlo, no habría movimiento relativo entre el rotor y el campo, y en consecuencia no se

# MOTORES DE INDUCCIÓN LINEAL



induciría f.e.m. en el deslizador. A esa diferencia de velocidad que existe en el campo magnético del estator y al campo magnético del deslizador o rotor se le denomina deslizamiento. A continuación se muestran los tipos de motores lineales de inducción. No se describe cada uno por que ya se ha mencionado en varias ocasiones en las páginas anteriores.

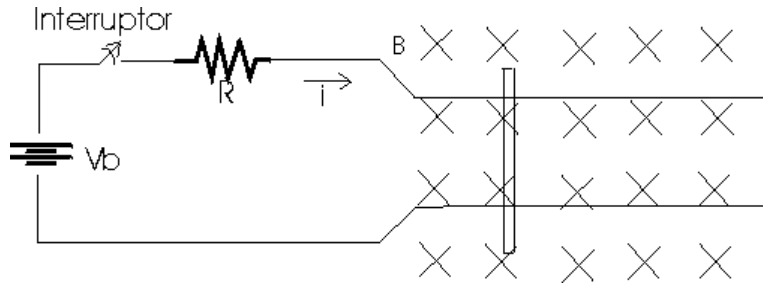
Figura 4.22 - Clasificación de los motores de inducción lineales

MOTORES  
LINEALES DE  
CORRIENTE  
CONTINÚA

MOTORES LINEALES DE CORRIENTE CONTINUA

La máquina lineal de corriente continua es la versión más sencilla y fácil de entender de una máquina de DC, ya que operan con los mismos principios y exhibe la misma conducta que los generadores y motores.

La figura siguiente (figura 5.23) muestra una máquina lineal DC, que consta de una batería y una resistencia conectada a través de un interruptor a un par de rieles lisos, sin rozamiento. En el lecho de esta



“vía férrea” hay un campo magnético constante de densidad uniforme, dirigido hacia adentro de la página. Sobre la pista así formada, se dispone una barra de metal.

Figura 4.23 - Máquina lineal de DC, la forma más simple de explicar las máquinas lineales de DC. El campo B apunta hacia la página y por una barra metálica que está en él circula una corriente I y hace que se desplace la barra.

La figura anterior muestra la máquina DC lineal en condiciones de arranque. Para ponerla en marcha simplemente se cierra el circuito y por el cual circulará una corriente a través de un

campo magnético permanente. Pero como un conductor que transporta una corriente en un campo magnético sufre de la acción de una fuerza perpendicular a ambos.

$$F = Bil$$

Donde:

F = Fuerza

B = Campo magnético

l = Longitud

Entonces la barra se acelera hacia la derecha, sin embargo al incrementar la velocidad de la barra se induce un voltaje en ella. El voltaje está dado por la siguiente ecuación:

$$e_{ind} = Blv$$

Donde:

v = Velocidad de la barra

El voltaje reduce la corriente que fluye en la barra y esto hace que se alcance una velocidad constante de estado estacionario donde la fuerza neta sobre la barra es cero. Esto ocurrirá cuando el voltaje inducido haya alcanzado un valor tal que iguale a  $V_b$ . La barra seguirá moviéndose a esa velocidad a menos que algún factor externo la altere.

Los motores lineales de corriente continua, al igual que los de corriente alterna tienen una correspondencia con los motores rotatorios. Cabe aclarar que un motor rotatorio de corriente directa es diferente a un motor lineal de CD ya que un conmutador para este no es un aparato común comercialmente no está disponible. Las características de fuerza velocidad de los motores de CD de todos los tipos rotatorios se pueden obtener con motores de corriente alterna y con controles de estado sólido

*MOTOR  
HOMOPOLAR  
DE CD TIPO  
ESCOBILLA LINEAL*

*MOTOR HOMOPOLAR DE CD TIPO ESCOBILLA LINEAL*

El motor homopolar de CD del tipo escobilla lineal es el equivalente lineal del motor y bomba magnetohidrodinámicos como se muestra en la Figura 4.24. Una corriente de campo estacionario y constante de CD produce un flujo magnético hacia abajo. Se aplica una corriente directa a las escobillas en ángulos rectos al flujo del campo, y se produce movimiento (fuerza) ortogonal tanto al flujo como a la corriente.

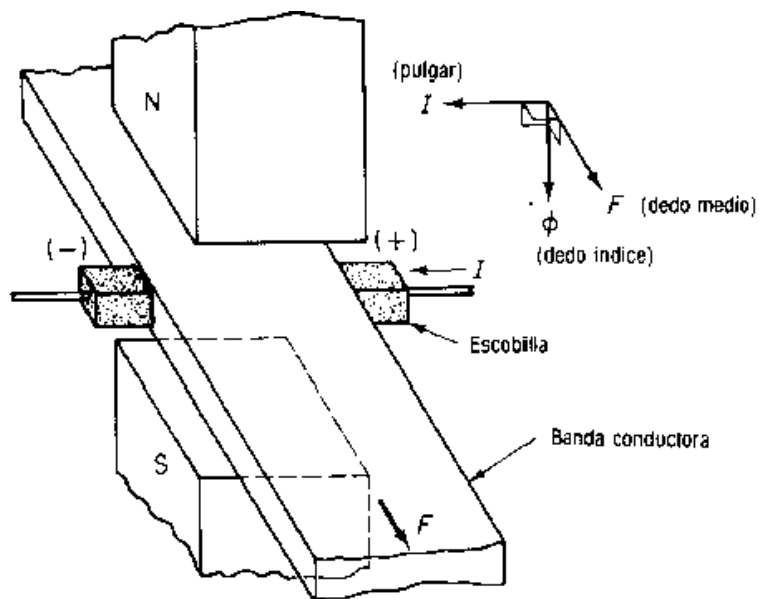


Figura 4.24 - Motor homopolar lineal de CD de tipo escobillas

*MOTOR DE  
CORRIENTE  
DIRECTA LINEAL  
SIN ESCOBILLAS*

*MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA LINEAL SIN ESCOBILLAS*

El equivalente lineal del motor rotatorio sin escobillas se muestra en la siguiente figura (Figura 4.25). La armadura consiste de grupos de bobinas estacionarias, desplazadas que reciben su excitación a través de un sistema de control con tiristor, que produce pulsos de CD en las bobinas alternadas en el instante adecuado dependiendo de posición del campo móvil. El campo magnético puede ser un imán permanente o se puede excitar a partir de un suministro de CD a un electroimán en la estructura de campo del vehículo lineal. Es interesante notar que la configuración representada en la figura no solo imparte una fuerza de propulsión ( $F$ ) a la estructura del campo, sino que también produce una fuerza de levitación ( $f_L$ ) en forma simultánea y en ángulo recto con la fuerza de propulsión. Como el caso del motor tipo escobilla lineal, la fuerza es función directa de la magnitud de la corriente de armadura, la cual determina la velocidad del vehículo.

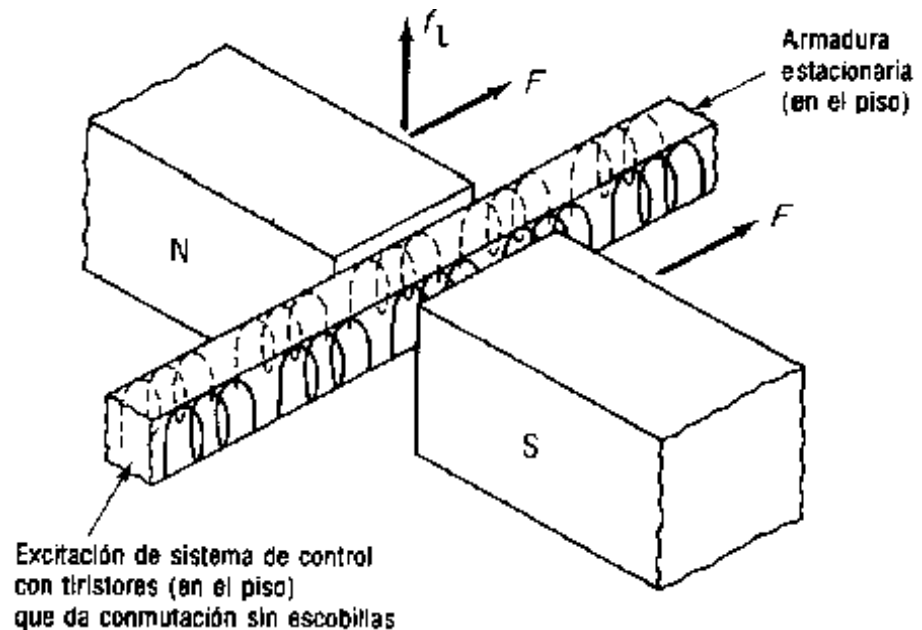


Figura 4.25 - Motor lineal de CD sin escobillas

Como podemos ver, los motores lineales de corriente continua son de variadas formas y configuraciones. A continuación mostramos las cinco principales configuraciones de los motores lineales de DC:

## MOTORES LINEALES DE CORRIENTE DIRECTA

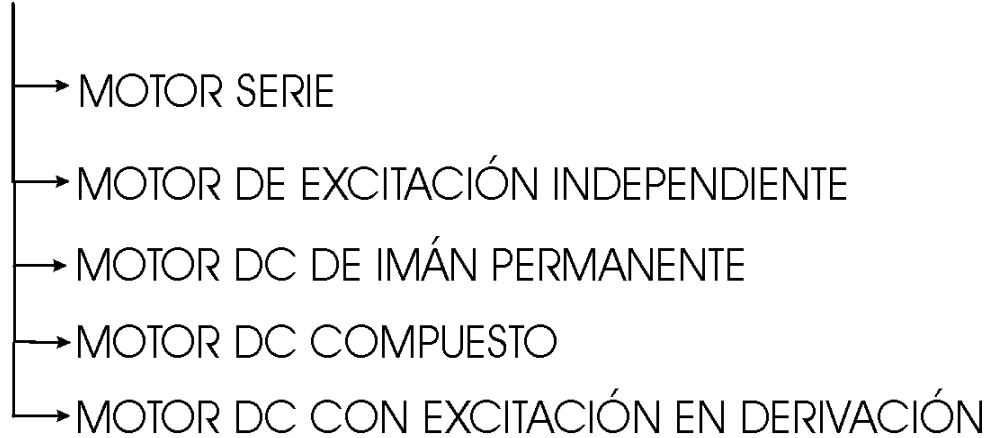


Figura 4.26 - Clasificación de los motores lineales de corriente directa

### MOTORES ESPECIALES

### MOTORES ESPECIALES

Además de los motores tradicionales, también existen motores con configuraciones especiales que fueron diseñados para aplicaciones particulares. Este tipo especial de motores existen tanto para los rotatorios como para los lineales. Hay configuraciones que son comunes para los rotatorios como para los lineales, como son los motores de pasos y los servomotores, pero también existe una clase de motores que son exclusivos de los lineales y que generan fuerzas normales al desplazamiento y que se utilizan para formar las máquinas de levitación magnéticas, que veremos a continuación.

#### *MOTOR LINEAL A PASOS*

#### *MOTOR LINEAL A PASOS*

El primero de los motores especiales es el motor lineal a pasos. Los motores paso a paso son ideales para la construcción de mecanismos en donde se requieren movimientos muy precisos. La característica principal de estos motores es el hecho de poder moverlos un paso a la vez por cada pulso que se le aplique. Este paso puede variar desde  $90^\circ$  hasta pequeños movimientos de tan solo  $1.8^\circ$ , en motores rotatorios.

Estos motores poseen la habilidad de poder quedar enclavados en una posición o bien totalmente libres. Si una o más de sus bobinas está energizada, el motor estará enclavado en la posición correspondiente y por el contrario quedará completamente libre si no circula corriente por ninguna de sus bobinas.



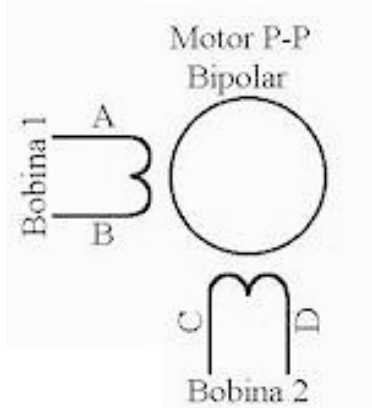


Figura 4.27 - Esquema de un motor a pasos rotacional bipolar

Básicamente estos motores están constituidos normalmente por un rotor sobre el que van aplicados distintos imanes permanentes y por un cierto número de bobinas excitadoras bobinadas en su estator. Las bobinas son parte del estator y el rotor es un imán permanente. Toda la conmutación (o excitación de las bobinas) deber ser externamente manejada por un controlador. Existen dos tipos de motores paso a paso de imán permanente:

El primero de ellos es el Motor a Pasos Bipolar, este tiene generalmente cuatro cables de salida (ver Figura 4.27).

Necesitan ciertos trucos y dispositivos adicionales para ser controlados, debido a que requieren del cambio de dirección del flujo de corriente a través de las bobinas en la secuencia apropiada para realizar un movimiento. Como se comprenderá será necesario un Puente H por cada bobina del motor, es decir que para controlar un motor Paso a Paso de 4 cables (dos bobinas), necesitaremos usar dos Puentes H.

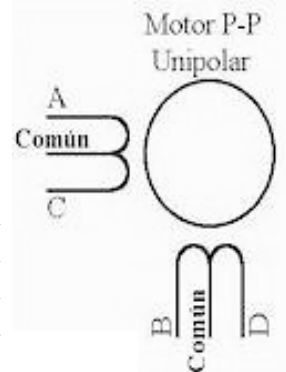


Figura 4.28 - Esquema de un motor a pasos rotacional unipolar

El otro es el Motor a Pasos Unipolar. Este motor suele tener 6 o 5 cables de salida, dependiendo de su conexión interna (ver Figura 4.28). Y para poder hacer girar este motor hay que realizar una secuencia el motor avanza un paso por vez y debido a que siempre hay al menos dos bobinas activadas, se obtiene un alto torque de paso y de retención.

El motor de pasos lineal se ha hecho plano en vez de redondo para que su movimiento esté a lo largo de una línea recta en vez de que gire. Una fotografía de un motor lineal comercial con su controlador se muestra en la figura contigua.

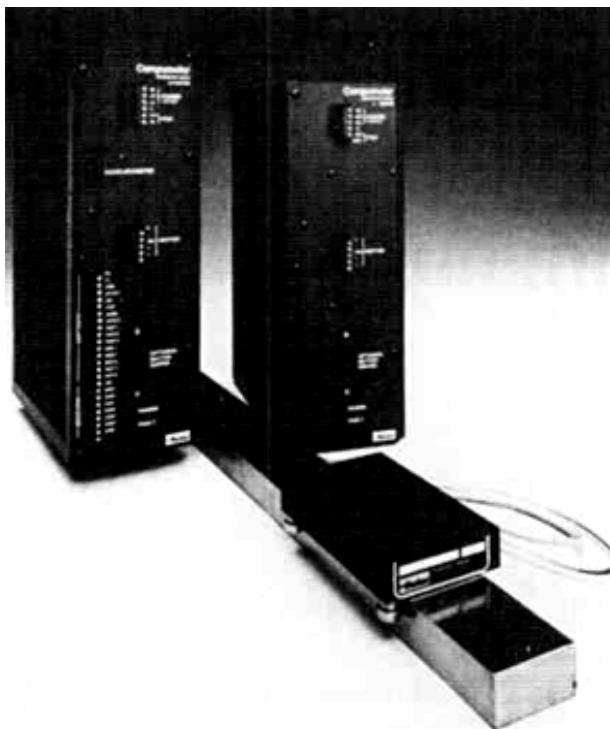


Figura 4.29 - Motor lineal a pasos de Parker Computomotor Division

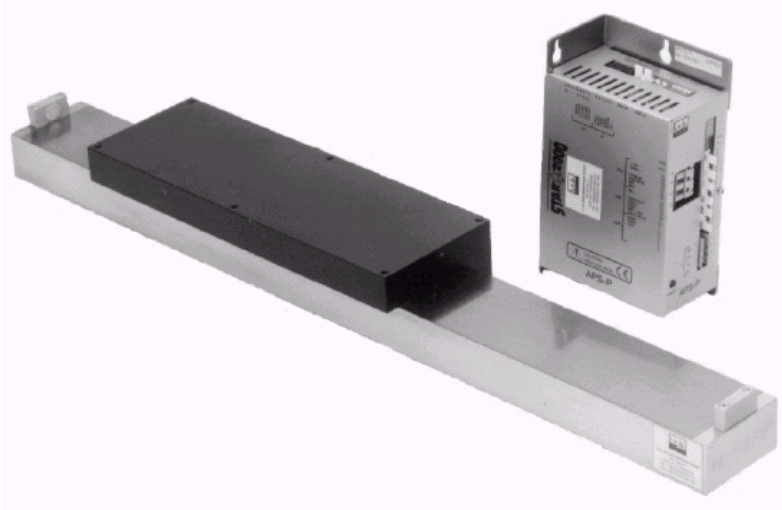


Figura 4.30 - Motor lineal a pasos Cobra 643 con su controlador Star2000 APS4-P de ACP&D Limited

También mostramos la fotografía de otro motor a pasos más moderno de la serie Cobra, fabricado por la empresa ACP&D Limited. Su fuerza de retención puede variar entre 15 y 4,050 Newtons, con una velocidad máxima de 3 metros por segundo, un paso de 1/8 de milímetro y una precisión de 50 micras

Para ilustrar el funcionamiento del motor a pasos vamos a utilizar como ejemplo el esquema del motor de la compañía Parker (Figura 4.31).

En este diagrama se muestra que el motor consiste de un estator y un deslizador. El estator es la pieza fija del motor y su longitud determinará la distancia que el motor viajará. El deslizador consiste en cuatro polos con tres dientes cada uno. Cada diente tiene la misma dimensión que los que existen en el estator. Puede utilizar rodillos mecánicos sujetos por unos cojinetes o se le puede inyectar aire por unos agujeros en el estator para separar al rotor de su deslizador. El deslizador consiste en dos electroimanes imán A y el imán B y un

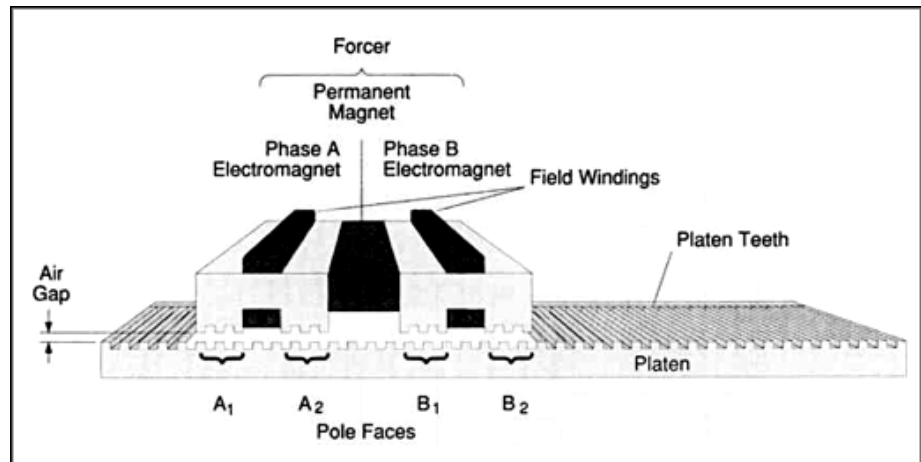


Figura 4.31 - Esquema de construcción del motor a pasos lineal de la compañía Parker.

imán permanente. El imán permanente es un imán fuerte de tierras raras. Los electroimanes se hacen con la forma de dientes del estator para que puedan concentrar su flujo magnético.

El deslizador tiene cuatro segmentos con tres dientes cada uno y estos dientes están espaciados en cuadratura para que solo un conjunto de dientes esté alineado con los dientes del estator en cualquier momento. Cuando se hace circular una corriente en los devanados de los electroimanes, su flujo magnético pasa con el entrehierro de aire entre el deslizador y el estator, causando una atracción fuerte entre los dos. El flujo magnético de los electroimanes también tiende para reforzar las líneas del flujo de uno de los imanes permanentes y cancela las líneas del flujo del otro. Las fuerzas de atracción cuando está fluyendo la máxima corriente es hasta diez veces la fuerza de retención.

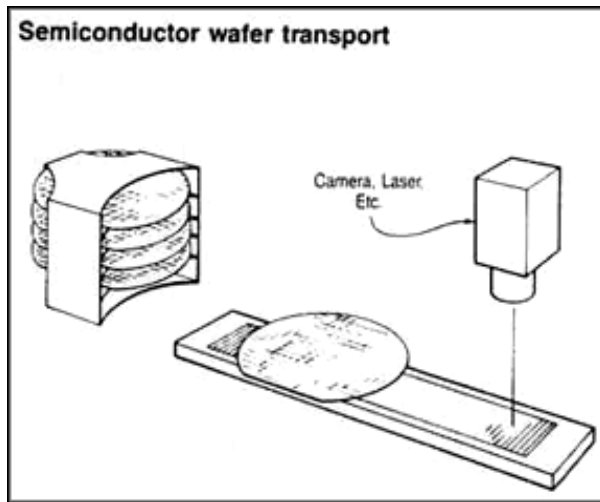


Figura 4.32 - Un motor lineal a pasos es utilizado para transportar una oblea semiconductora a una cámara de inspección. La exactitud en esta aplicación en especial es de suma importancia. Por ello es que un motor a pasos lineal es el ideal para esta aplicación

Cuando se aplica la secuencia de accionamiento de los devanados apropiadamente el campo magnético generado mueve al deslizador de un diente a otro en una dirección dada. Cuando se invierte la secuencia anterior, el deslizador invertirá su dirección del recorrido. Cuando se deja de suministrar la corriente a los devanados, el deslizador se alinearán naturalmente con el diente respectivo y el imán permanente generara la fuerza suficiente para prevenir que el deslizador se desplace al diente contiguo. El encargado de generar dicha secuencia, energizando y desenergizando los electroimanes del deslizador es el controlador, quien aparte de dar la secuencia puede controlar la dirección y velocidad del desplazamiento. }

Un ciclo completo de la conmutación consiste en cuatro pasos completos, que mueve un diente de distancia al deslizador. La resolución típica de un motor lineal es 12,500 pasos por la pulgada, que proporciona una gran resolución.

La aplicación típica para la utilización de motores lineales a pasos es la de mover una carga de poca masa, pero a grandes velocidades. Tal es el caso mostrado en la Figura 4.32 donde el motor lineal se utiliza para transportar una oblea de un semiconductor a través de una estación de la inspección de laser. El motor lineal proporciona la precisión necesaria para que la oblea esté perfectamente colocada y la cámara de inspección pueda realizar su trabajo

## MÁQUINAS DE LEVITACIÓN MAGNÉTICA

Para la transportación terrestre a alta velocidad es importante que el vehículo no tenga contacto físico con la vía, y para tales aplicaciones se han propuesto varios sistemas de suspensión, usando para ello a las máquinas de levitación.

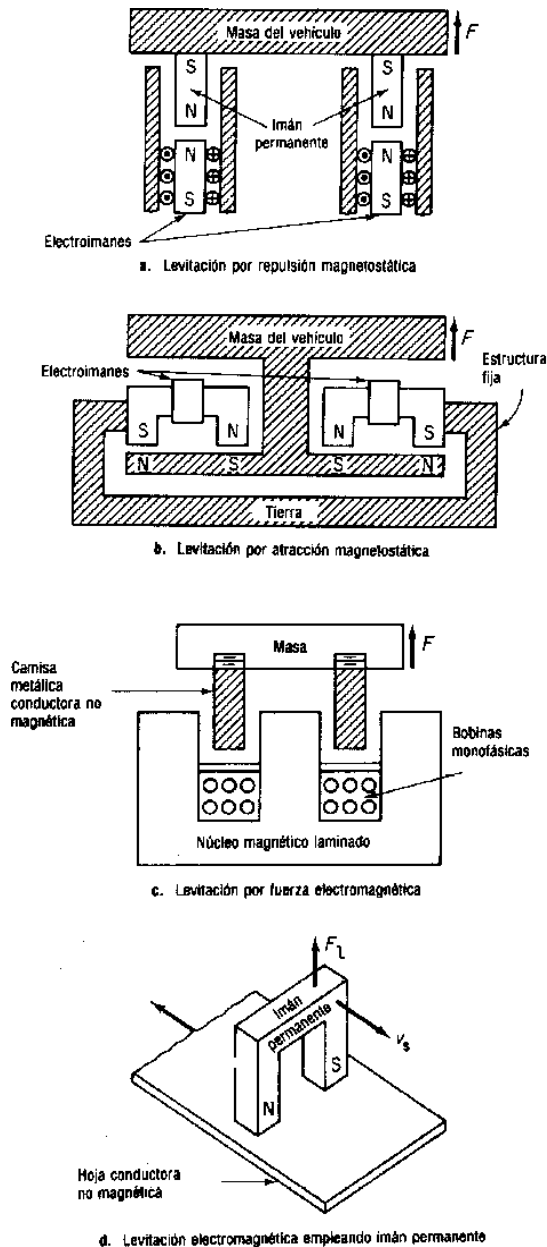


Figura 4.33 - Máquinas de levitación magnética

Existen dos tipos de máquinas de levitación. Estas pueden ser de atracción o de repulsión (ver figuras 5.33a y 5.33b). Generalmente, la máquina lineal del tipo atracción es muy inestable bajo ciertas condiciones. No obstante tales máquinas pueden ser estabilizadas. Una máquina de corriente alterna de levitación del tipo atracción se representa en la (Figura 4.33b). Por lo tanto, para un entrehierro pequeño, la fuerza neta entre el secundario fijo y el primario en movimiento con su polo de CA sirve para restablecer el equilibrio.

Dos desventajas obvias de este sistema son la cerrada restricción que debe haber en la tolerancia del entrehierro y las pequeñas perturbaciones que pueden aparecer debidas a la fuerza de arrastre (o de frenado) debidas a las corrientes de Eddy inducidas en el secundario.

Las pequeñas perturbaciones sobre el entrehierro de la máquina se pueden superar usando una máquina de levitación del tipo atracción teniendo una retroalimentación de que dependa del entrehierro. Por lo tanto, la fuerza de arrastre esta presente en este tipo de máquinas.

La máquina de levitación del tipo inducción se basa en el principio de que si un polo es movido sobre una lámina conductora, las corrientes de Eddy inducidas en lámina causaran una fuerza de repulsión entre el polo y la lámina (Figura 4.33d). En la práctica, el polo puede ser un electromagnetito y la lamina puede ser remplazada por una escalera de barras o por bobinas individuales cortocircuitadas (Figura 4.33c). Como en la máquina del tipo atracción, la máquina de levitación del tipo repulsión de inducción carece de la presencia de una fuerza de arrastre. A continuación damos una clasificación de las máquinas de levitación magnético

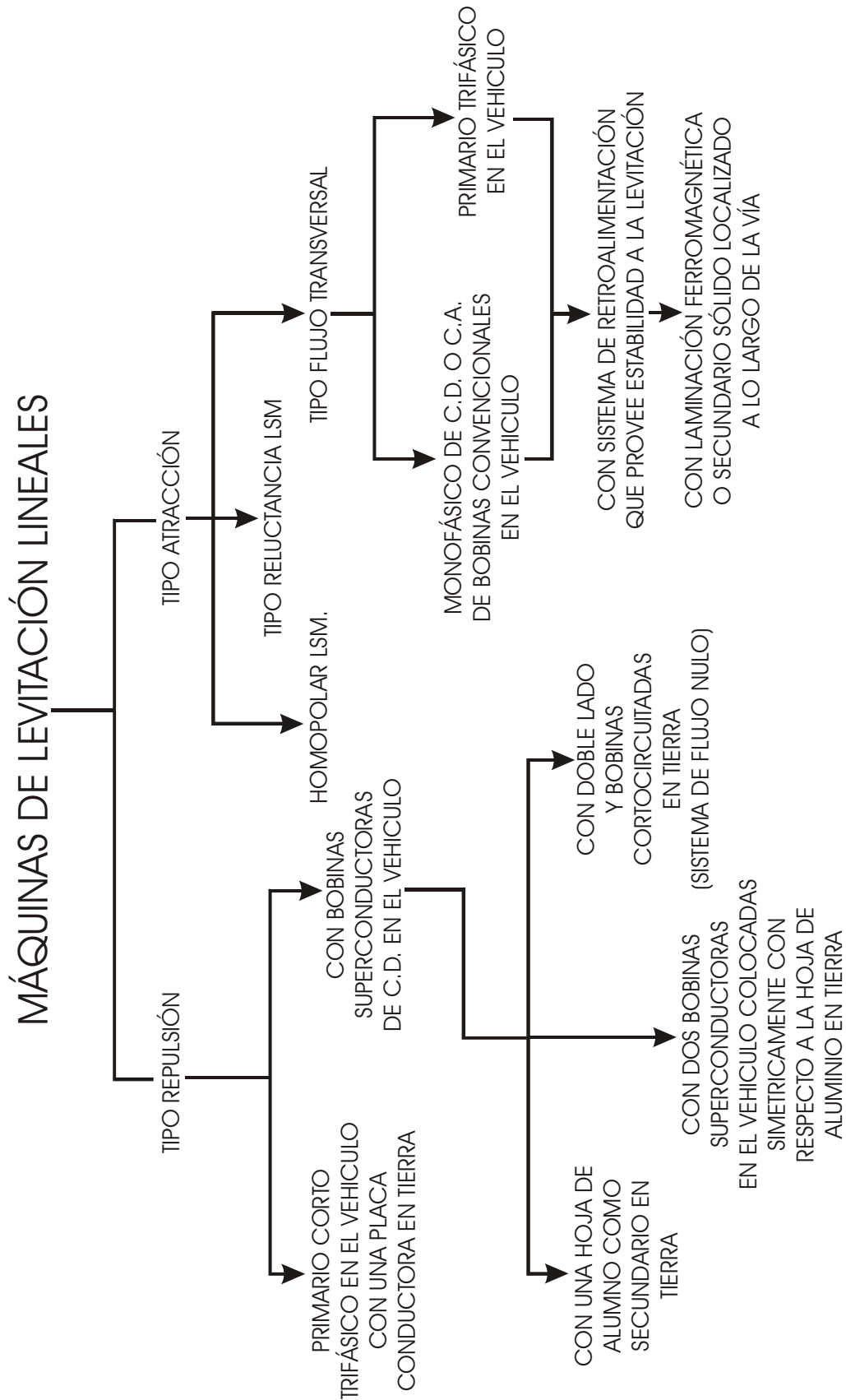


Figura 4.34 - Clasificación de las máquinas de levitación magnética lineales

## MOTORES LINEALES PLANOS BIDIMENSIONALES

### MOTORES LINEALES PLANOS BIDIMENSIONALES

Otro tipo de motores especiales son los motores lineales planos bidimensionales o también llamados tablas X Y, constan básicamente de un estator (platen) y un deslizador (forcer) bidimensionales (ver Figura 4.36). Es decir constan de bobinados apostados en ambas direcciones X, Y.

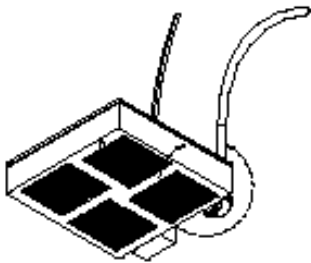


Figura 4.35 - Dibujo de un deslizador para un motor lineal a pasos bidimensional

Generalmente los motores planos bidimensionales o tablas X Y son motores lineales a pasos ya sea de tipo unifilar o de reluctancia. Para comprender mejor la construcción de este motor, debemos de imaginar un motor lineal a pasos al que se mueve en una única dirección y al cual se le incorpora otro motor a pasos perpendicular para darle movilidad en el otro eje. Hacemos un arreglo con esas bobinas y nos queda un deslizador parecido al que se muestra en la figura de la izquierda (Figura 4.35)

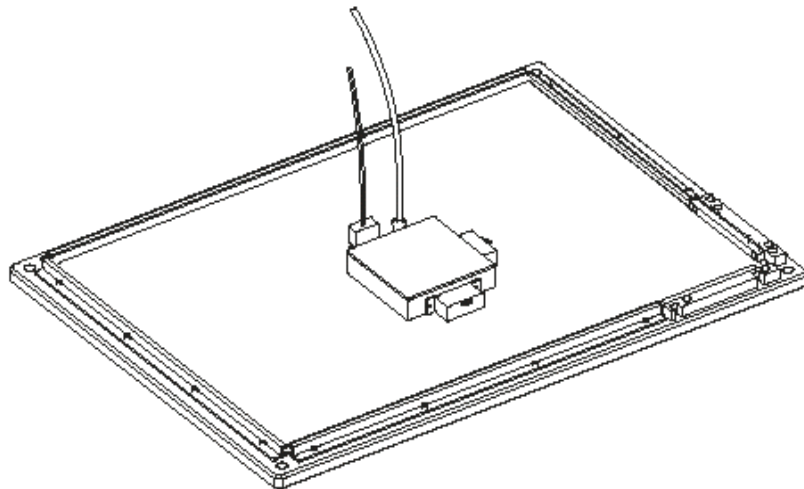


Figura 4.36 - Dibujo de un motor lineal plano bidimensional a pasos



Figura 4.37 - Fotografía de una aplicación de un motor lineal bidimensional para una rectificadora

Los estatores de estos motores, por lo general, están provistos de sistemas neumáticos o magnéticos para separar el deslizador del estator y evitar así las fricciones mecánicas. También vienen provistos con uno o varios sensores de posicionamiento electrónico, que retroalimentan al controlador. También vienen con sus respectivo controlador para posicionar al deslizador en el lugar adecuado. Estos motores tienen resoluciones típicas de 0.01 mm, fuerzas máximas de 133 Newtons y aceleraciones de 2g, repetitividad de 5Fm. Son ideales para aplicaciones donde se requiere de mucha exactitud y sin preocuparse por los problemas de control ya que están diseñados para trabajar a lazo abierto

COMPARATIVO  
DE DIVERSOS  
MOTORES  
LINEALES

COMPARATIVO DE DIVERSOS MOTORES LINEALES

Ahora que ya hemos visto la clasificación de los motores lineales y hemos dado una breve descripción de cada uno. Es tiempo de hacer una comparativa sobre las características de algunos motores.

TIPO DE MOTOR	EMPUJE / ÁREA (libra / Pulgada)	EFICIENCIA	POTENCIA / PESO	CONFIABILIDAD	CONTROLABILIDAD
Motor Lineal de inducción de doble cara	6.8	Media	Media	Alta	Buena
Motor Lineal de Inducción de una sola cara	3.4	Media	Media	Alta	Buena
Motor Homopolar Lineal de CD	0.15	Baja	Alta	Baja	Buena
Motor Lineal de CD sin escobillas	1.65	Alta	Baja	Alta	Complicada
Motor Lineal Síncrono (campo excitado o permanente)	5.5	Media	Media	Media	Buena
Motor Lineal Homopolar Síncrono	2.4	Alta	Alta	Media	Buena
Motor Lineal (síncrono) de reluctancia	2.5	Media	Media	Alta	Buena

\* Tabla obtenida del libro de Máquinas Eléctricas y Transformadores de Irving L. Kosow

Shinko Electric, nos da una serie de consejos al seleccionar motores lineales de inducción o síncronos dependiendo de la aplicación. Esta compañía indica que los motores lineales de inducción no son fáciles de controlar su posición, pero que su fortaleza es la velocidad, el recorrido de grandes distancias, su gran capacidad para proporcionar aceleración.

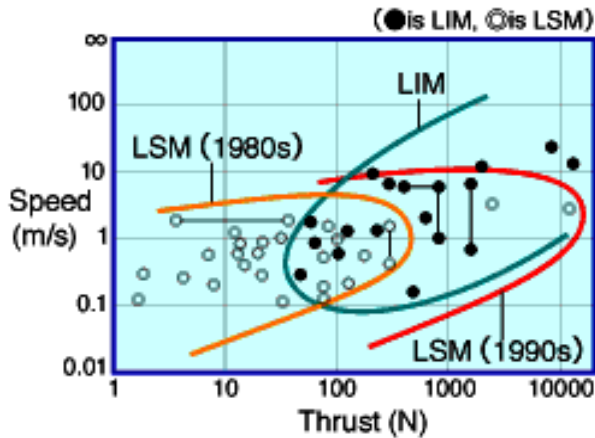


Figura 4.38 - Gráfico Velocidad contra confiabilidad de los motores lineales, tomado de un artículo publicado por la compañía Shinko Electric

En cambio, los motores síncronos lineales de antes de la década de los 80's se caracterizan por ser buenos en aplicaciones de posicionamiento en distancias cortas. Y en la década de los 90's, con el avance de la teoría de control, los nuevos materiales para la fabricación de imanes permanentes y los avances en el campo de la instrumentación. Le dieron la capacidad a los motores síncronos lineales de operar en distancias grandes en aplicaciones de posicionamiento y con un alto grado de confiabilidad. A la izquierda de este párrafo se muestra un gráfico de las características de los motores lineales, la velocidades de operación y su confiabilidad.

También la misma compañía nos recomiendo utilizar los siguientes tipos de motores bajo las siguientes condiciones y requerimientos tecnológicos:

REQUERIMIENTO	RETO TECNOLÓGICO	MOTOR A UTILIZAR	EJEMPLO DE APLICACIÓN
Alta velocidad	Limitante de la velocidad máxima de rotación	Motor Lineal de Inducción	Transporte de hospital
	Limitante debida a los rodamientos	Motor Lineal de Inducción	Maquinaria de aplicación industrial a gran escala
Alta precisión	Limitante debida a los rodamientos, engranes	Motor síncrono de inducción com ayuda de ventilas de aire comprimido	Tablas de precisión, Herramientas de CNC
Alta confiabilidad	Remplazar a los dispositivos hidráulicos	Motor de pulso lineal	Maquinaria de producción de instrumentos de guerra
Limpieza	Limitante debida a los rodamientos, engranes y superficies de contacto	Motor Lineal Síncrono o de Inducción	Tablas de precisión
Diseño compacto	Limitante debida al espacio de la máquina rodante y su sistema de engranaje	Motor de pulso lineal	Transporte de semiconductores



**CLASIFICACIÓN  
DE ACUERDO  
AL NÚCLEO**

**CLASIFICACIÓN DE ACUERDO AL NÚCLEO**

Otra clasificación de los motores lineales es de acuerdo a la construcción de sus núcleos. El material con que se construye un motor afecta en el desempeño de la capacidad de ejercer una fuerza, del calor desprendido, etc. Existen tres tipos diferentes de núcleos utilizados en los motores lineales. Estas son:

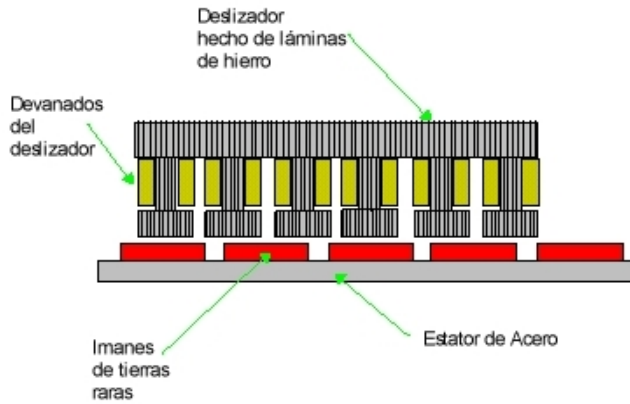


Figura 4.39 - Esquema de construcción de un motor lineal de núcleo de hierro

**MOTOR LINEAL DE NÚCLEO DE HIERRO LAMINADO:**

Este tipo de motor consiste de una placa de acero o hierro en el cual se le incrustan potentes imanes de tierras raras y juntos forman el estator de este motor. El deslizador o *Forcer* en inglés está hecho de pequeñas láminas de hierro, del mismo material de las que se construyen los motores rotacionales ordinarios. Los devanados se construyen en los dientes de la armadura del deslizador. En estos dientes se les pueden añadir sensores de temperatura o sensores de efecto de Hall, o sensores de comunicación. Este tipo de núcleo tiene la siguientes ventajas:

- T **MAYOR FUERZA POR VOLUMEN:** Se utilizan las laminaciones para concentrar el flujo magnético, este tipo de motor genera grandes fuerzas en un volumen dado
- T **MENOR COSTO:** Este tipo de núcleo reduce considerablemente el precio del motor, debido a que se utilizan electroimanes para substituir a los costosos imanes de tierras raras.
- T **BUENA DISIPACIÓN DE CALOR:** Las laminaciones de este tipo de motor impiden que las corrientes parásitas surtan un efecto mayor y generen mayor energía. Además se le puede poner tubos de ventilación entre las laminaciones, lo que ayuda en gran medida a la disipación del calor.

Así como este tipo de núcleo da estas ventajas, también da las siguientes desventajas:

- X **GRAN FUERZA DE ATRACCIÓN:** Como el deslizador está hecho de hierro y el entrehierro típico es cercano a los 0.8mm existirá una fuerza de atracción entre el deslizador y el estator. Y esta fuerza puede llegar a ser 10 veces mayor que la fuerza utilizada del motor. Por ejemplo si un motor genera 100 lb de fuerza continua, puede generar hasta 1000lb de fuerza de atracción

- X **COGGING:** Como el deslizador es de hierro y pasa sobre potentes imanes de tierras raras, hay variaciones en el campo magnético cuando el deslizador pasa de un imán al siguiente. Esto afecta directamente cuando el motor se desplaza a baja velocidad haciendo que el movimiento no sea a una velocidad uniforme.

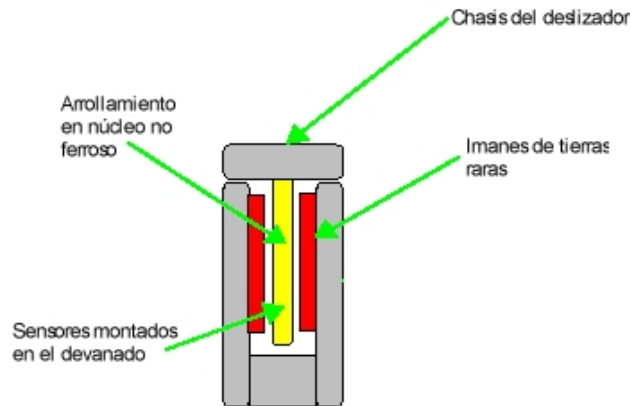


Figura 4.40 - Esquema de un motor lineal de núcleo de aire

#### **MOTOR LINEAL DE NÚCLEO DE AIRE:**

Este tipo de motor es denominado como motor de núcleo de aire o ausente de núcleo. Dos imanes permanentes de tierras raras se colocan en los costados del motor con caras opuestas una de la otra Norte y Sur. El deslizador está hecho de devanados atados y pegados con pegamento epóxico en un núcleo de aluminio, el chasis del deslizador también está hecho de aluminio y sirve para llevar la carga y para disipar la energía calorífica generada por el motor. Este motor cuenta con las siguientes ventajas:

- T **NO HAY FUERZAS DE ATRACCIÓN:** Como este dispositivo no contiene hierro, no existirá fuerzas de atracción entre el deslizador y el estator. El motor es más fácil de instalar y colocar sin las fuerzas de atracción presentes
- T **SIN COGGING:** Sin hierro en el motor, deja de existir el fenómeno de *cogging* antes mencionado. Este tipo de núcleo es ideal en aplicaciones donde se requiere un control de la velocidad extrema.
- T **DESLIZADOR DE POCO PESO:** Como el aluminio es mucho más liviano que el hierro y además el motor tiene menor cantidad, el peso del deslizador es mucho menor que uno con núcleo de hierro laminado. Un deslizador con bajo peso permita grandes aceleraciones y desaceleraciones en nuestra aplicación.

Este tipo de núcleo presenta las siguientes desventajas:

- T **POCA DISIPACIÓN DE CALOR:** Como el deslizador está hecho de arrollamientos atados y pegados epóxicamente, el calor tiene que viajar desde el centro del devanado hasta el chasis y tal vez por un disipador anexo al chasis. Y como la cantidad de metal es menor a el motor le cuesta más trabajo deshacerse de ese calor.

- T **DEBILIDAD ESTRUCTURAL:** Como este motor está hecho de bobinados atados y pegados epoxicamente y la fuerza se genera en las bobinas. Los esfuerzos internos del deslizador son soportados por el puro pegamento y las ataduras. Esto lo vuelve una desventaja por su frágil estructura, lo que lo limita en la fuerza que es capaz de proporcionar.
- T **POCA FUERZA POR VOLUMEN:** Debido a las desventajas de la disipación de calor, de su debilidad estructural, además de que las barras con los imanes incrustados le quitan mucho espacio

**MOTOR LINEAL CON NÚCLEO SIN RANURAR:** Este tipo de motor utiliza un núcleo híbrido de los dos anteriores. Fue diseñado y

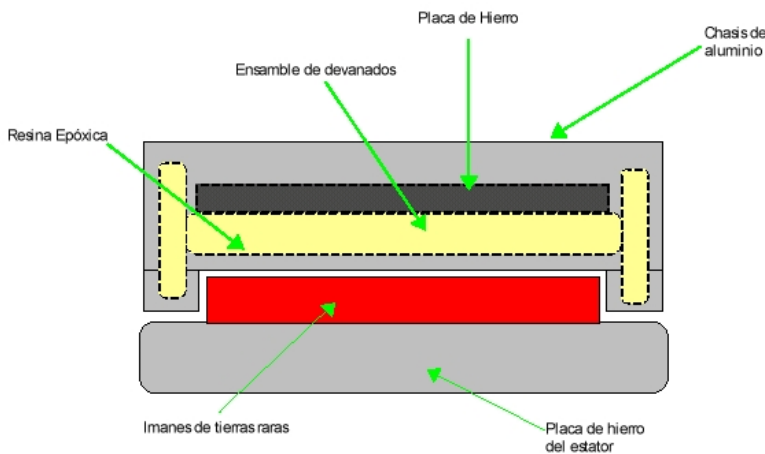


Figura 4.41 - Esquema de un motor con núcleo sin ranurar

construido por Compumotor y Daedal, este tipo de tecnología también es utilizada para los motores rotatorios. Utiliza devanados similares a los usados en los de núcleo de aire. Se coloca debajo de estos bobinados un plato de hierro. Todo esto se monta sobre un chasis elaborado de aluminio con forma de caja, y en la parte de abajo para sellar la caja se coloca una resina epóxica asegurando que la bobina y la placa se sujeten bien a la caja. Este motor tiene las siguientes características:

- T **FUERZA ESTRUCTURAL MEJORADA:** Como el deslizador está encapsulado en un chasis de aluminio y la fuerza se transmite directamente al cajón de aluminio.
- T **MENOR PESO DEL DESLIZADOR:** Este es un diseño híbrido y por tanto no es tan liviano como el de núcleo de aire, pero tampoco es tan pesado como el de núcleo de hierro
- T **MENORES FUERZAS DE ATRACCIÓN:** Como este diseño cuenta con una placa de hierro arriba de los devanados, sí presenta una fuerza de atracción entre el deslizador y el estator. Pero ésta es mucho menor debido a que está más retirado de los imanes permanentes además de que tiene que cruzar la resina epóxica, que tiene una menor permeabilidad magnética que el hierro.

- T MENOR COGGING: Ya que este diseño integra una mayor distancia entre los imanes y la placa de hierro, el fenómeno de cogging es reducido en gran medida también.
- T MEJOR DISIPACIÓN DE CALOR: Al igual que la característica del peso, la disipación de calor es menor que la capacidad del núcleo de hierro pero mayor que la de núcleo de aire. Esto es debido a que el calor viaja directamente a la placa de hierro y ésta la transmite a la caja de aluminio.
- T FUERZA / VOLUMEN MEJORADA: Al igual que la característica anterior, es mejor que la de núcleo de hierro pero no tan buena como la de núcleo de aire.

A continuación presentamos una tabla comparativa de los tres tipos de núcleos expuestos:

CARACTERÍSTICA	NÚCLEO DE HIERRO LAMINADO	NÚCLEO DE AIRE	NÚCLEO SIN RANURAS
<b>Costo</b>	Baja	Alto	Muy bajo
<b>Fuerza de atracción</b>	Alta	Inexistente	Moderado
<b><i>Cogging</i></b>	Alta	Inexistente	Moderado
<b>Fuerza / Volumen</b>	Muy alta	Moderado	Bueno
<b>Disipación de Calor</b>	Muy alta	Muy bajo	Bueno
<b>Peso del deslizador</b>	Pesado	Liviano	Moderado
<b>Fuerza del motor</b>	Muy alta	Muy bajo	Bueno

# DETALLES DE CONSTRUCCIÓN DE MOTORES PLANOS

## DETALLES DE CONSTRUCCIÓN DE MOTORES PLANOS

Un motor de inducción lineal, como dijimos anteriormente se obtiene por un proceso imaginario de corte y desenrollo de un motor de inducción rotatorio. En la práctica, la armadura de el primario consiste de un bloque rectangular de estructura ranurada como se muestra a continuación, y que está formada de un paquete de laminaciones de aluminio.

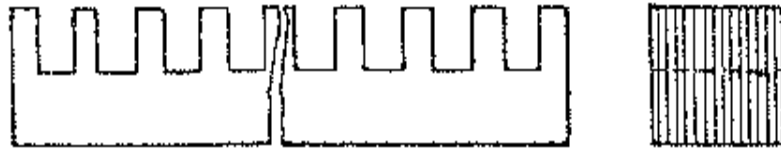


Figura 4.42 - Armadura general del primario en un motor lineal

Los motores lineales de inducción de cara sencilla constan de una sola de estas placas y los motores de doble cara, constan de dos de ellas colocadas de forma opuesta. Dentro de las ranuras de los bloques primarios son depositados los devanados polifásicos o trifásicos, las cuales producen el campo magnético viajero lineal. Semejante al campo magnético generado en un motor de inducción rotatorio producido por los devanados polifásicos del estator.

Los devanados para los motores lineales de inducción se asemejan a los de los devanados de los motores rotatorios de inducción. Las principales configuraciones o arreglos para estos devanados son los siguientes:

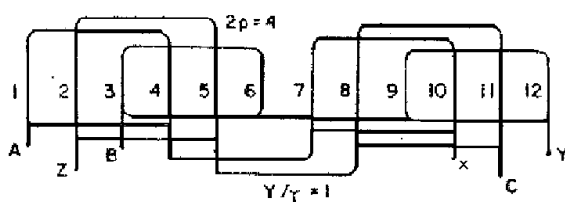


Figura 4.43 - Configuración de los devanados de un motor lineal de una capa con un número par de polos

- T Devanados de una capa con número par de polos (ver Figura 4.43)
- T Devanados de tres capas con un número par de polos (ver Figura 4.45)
- T Devanados de dos capas con número impar de polos y las ranuras de los extremos medio llenas (ver Figura 4.44)
- T Devanados económicos para Motores Lineales Síncrono de Inducción de muy baja potencia (Figura 4.46)

Las ventajas y desventajas de estos devanados son relacionadas con sus costos de manufactura y a la capacidad para producir una distribución del campo en el entrehierro aproximandose a la onda viajera más pura posible.

El campo en el entrehierro de los devanados se muestra en las siguientes figuras 5.47 y 5.48 con el secundario abierto, se exhiben las componentes pulsantes al lado de las ondas viajeras debidas a que el circuito magnético está abierto.

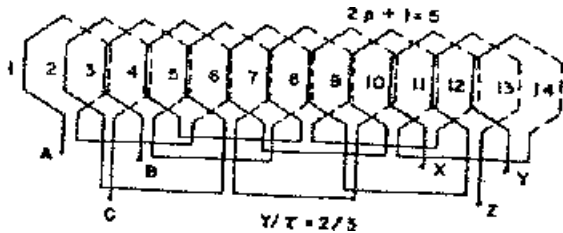


Figura 4.44 - Devanados de dos capas con número impar de polos y las ranuras de los extremos medio llenas.

También se ha encontrado que el devanado de dos capas con número impar de polos (ver Figura 4.44) desarrolla una onda en el entrehierro pura en la zona central. Considerando como los componentes pulsantes los cuales concurren solamente a lo largo del margen en los polos del devanado. Así en las aplicaciones de alto empuje, estos devanados son los más adecuados. Todos los devanados mencionados a excepción del devanado económico son los más usados para alojarlos en los núcleos magnéticos.

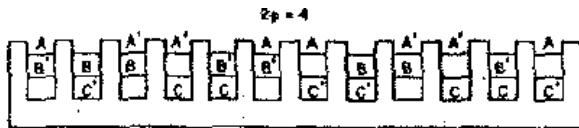


Figura 4.45 - Devanados de tres capas con un número par de polos.

Reduciendo las puntas conectadas, los devanados de tres capas y el económico mostrado en las (figuras 5.45 y 5.46) utilizan mejor el cobre y en algunas aplicaciones estas características mejoran los diseños.

La Figura 4.46 es un devanado muy económico, que produce pronunciadas armónicas en el espacio del campo en el entrehierro y su factor de devanado es más pobre, pero para valores de empuje de bajo nivel (de 20 a 30 N), el peso del cobre, y el montaje de las bobinas en el núcleo, fomentan el uso de estos devanados. Ya que el circuito magnético de un motor lineal de inducción tiene un principio y un fin (diferente al de un motor rotatorio), las ranuras del primario de un motor lineal no están siempre llenas. En tales casos, las ranuras de los extremos del primarios son ranuras medio llenas (ver Figura 4.44).

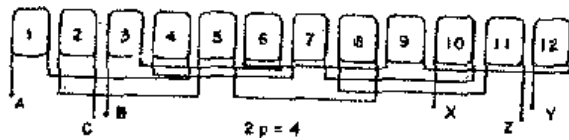


Figura 4.46 - Devanado económico para motores de muy baja potencia

En la mayoría de los casos, los secundarios de los motores síncronos lineales son de placas de aluminio. Las secciones transversales longitudinales de un motor de inducción de doble cara y de uno síncrono se muestran en las figuras 5.47 y 5.48) respectivamente. Estas figuras muestran las trayectorias de los flujos magnéticos producidos por los devanados del primario.

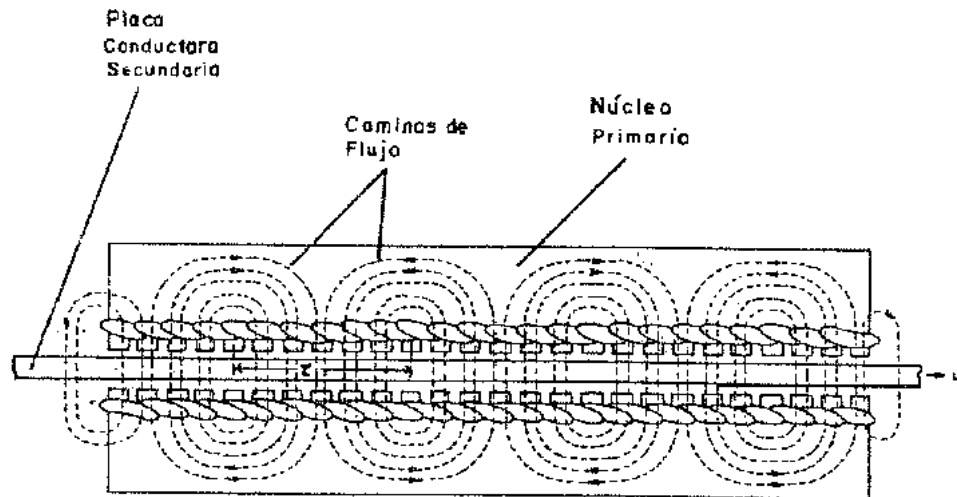


Figura 4.47 - Corte transversal de un motor lineal de inducción de doble cara

Haciendo notar que los flujos tienden a ser asimétricos en las puntas del primario, aunque los primarios se devanan de tal forma que tengan cuatro polos. También observamos de la Figura 4.48 que una gran parte de la trayectoria del flujo viaja a través del aire. Consecuentemente el circuito magnético del motor lineal de la Figura 4.48 es muy pobre. Para mejorar esta situación del circuito magnético, el secundario se refuerza en la parte trasera por otro sólido o por un cuerpo laminado. Por supuesto, en muchas aplicaciones, tal como el manejo de material, el objeto a ser movido constituye el secundario del motor lineal.

En general el secundario de los motores síncronos lineales planos son de

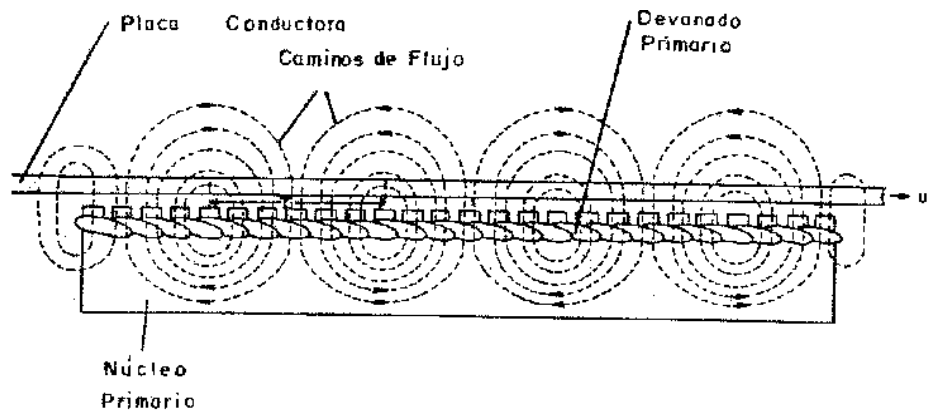


Figura 4.48 - Sección transversal de un motor lineal de una sola cara.

laminaciones de aluminio o cobre, con o sin un respaldo de una placa de hierro sólida. En casos especiales un núcleo ranurado y laminado tipo escalera se puede usar.

## APLICACIONES DE LOS MOTORES LINEALES

Ahora que ya hemos pasado la parte más difícil al describir el funcionamiento, la cantidad de tipos de motores sus características, etc. Ahora es tiempo de hablar de las aplicaciones más usuales de los motores lineales.

### APLICACIONES DE ALTA VELOCIDAD

#### APLICACIONES DE ALTA VELOCIDAD



Figura 4.49- Fotografía de un transporte terrestre de alta velocidad que utiliza un motor síncrono lineal

Las aplicaciones a alta velocidad de los motores lineales son principalmente en sistemas de propulsión y levitación para transportación terrestre a alta velocidad. Los motores rotatorios escasamente son seleccionados para servir en altas velocidades tales como 250 Km/hr a causa de la fricción y otras causas mecánicas. Por otro lado, un motor lineal ofrece un medio de propulsión que es idealmente adecuado para velocidades que excedan esos 250 km/hr. Para esas altas velocidades en las cuales el contacto mecánico es indeseable, se recomienda el uso de una máquina de levitación cuyo sistema de suspensión electromagnética sea capaz de levantar por completo el objeto a transportar.

En aplicaciones de alta velocidad, los motores lineales proveen el empuje y la fuerza de levitación para suspender el vehículo. En algunas otras ocasiones los motores lineales solo son usados solamente para propulsión y el vehículo es soportado sobre un riel común o un cojinete de aire. Para asegurar la propulsión correcta al vehículo, el motor lineal otorga el empuje y la aceleración necesaria para impulsar el vehículo a grandes velocidades. Además como ventaja adicional el motor lineal colabora en el frenado del vehículo. Para ambos propósitos la propulsión y suspensión de vehículos terrestres de alta velocidad se han realizado experimentos con motores lineales y los resultados de las pruebas han resultado muy buenos.

Dentro de todos los tipos de motores lineales existentes se ha demostrado experimentalmente que, en la actualidad, el motor lineal más indicado para un vehículo de transporte terrestre de alta velocidad es un motor síncrono lineal o un motor de inducción lineal. Esto es debido a que para la transportación terrestres de alta velocidad se recorren grandes distancias y se requiere de una gran potencia, eficiencia, factor de potencia y alto voltaje, así como un bajo peso y volumen. Estos puntos son, los factores críticos que los diseñadores de estos vehículos consideran en la selección y diseño de los motores lineales.

Los países que más han desarrollado estas aplicaciones se encuentra Japón, Alemania y Estados Unidos. Dentro de los alcances que han tenido cabe resaltar que en la extinta Alemania del Este se ha probado un sistema de suspensión del tipo atracción. La fuerza de atracción entre el electroimán abordo y los rieles guía de acero producen la elevación y conducción.

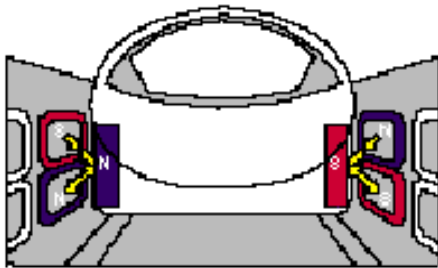


Un espacio de 15mm puede mantenerse entre el polo y la vía con una potencia de salida al rededor de 2Kw por tonelada de peso suspendido. Un sistema de retroalimentación monitorea el espacio y ajusta la corriente en el electroimán para superar la inestabilidad inherente a un sistema de atracción.

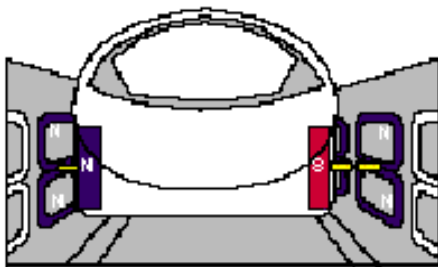
Un sistema de suspensión del tipo repulsión es considerado prometedor. El primario corto de un MIL se coloca sobre un vehículo (con un panel como fuente de potencia a bordo) con una guía de aluminio (o vía) como el secundario, así fue probado y parece ser una de las soluciones.

Un MIL de cara sencilla con un primario corto sobre el vehículo y un secundario de aluminio con respaldo de hierro también ha sido propuesto para altas velocidades, pero no hay ningún problema de potencia en el vehículo que se reporte para que se construya. Algunas pruebas a gran escala en vehículos han sido realizadas usando los MSL para propulsión.

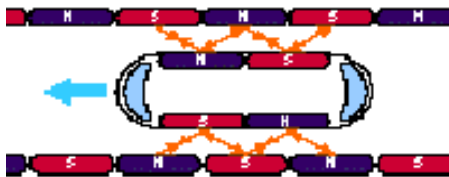
Los vehículos con un MSL como propulsor son muy prometedores para los TTAV. Polos semiconductores alojados sobre el vehículo son usados como excitación de campo del motor y la vía consiste de una armadura polifásica con un núcleo de aire, de esta forma un MSL puede ser usado para producir un empuje así como una fuerza de levitación. Por otro lado una máquina de levitación puede usarse par proveer la suspensión de un vehículo de alta velocidad.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.50 - Esquema que muestra el principio de funcionamiento de un tren de alta velocidad MAGLEV

## MAGLEV

Otro de las aplicaciones de los motores lineales como máquinas de alta velocidad son los de tecnologías de levitación magnética (MAGLEV). La tecnología MAGLEV es un sistema en el cual se hace levitar un vehículo, por medio de poderosos electroimanes e imanes permanentes de tierras raras que están colocados dentro del vehículo. Para que el vehículo pueda levitar en este sistema en particular es necesario que el vehículo tenga una alta velocidad, ya que, como se ve en la Figura 4.50a en los costados de la barda guía se colocan unas bobinas superconductoras que al pasar los imanes del vehículo a altas velocidades inducen una fuerza electromotriz, que hace que se genere un campo magnético en ellas, y que los dos campos interactúen, generando con ello una fuerza que levanta el vehículo hasta cierta altura, con lo que se garantiza la levitación del vehículo.

Una de las ventajas al utilizar este sistema es que el vehículo es muy ligero. ya que, el vehículo no transporta transformadores o inversores y por tanto no se consume mucha energía para hacerlo levitar. Otra ventaja es que el vehículo no lleva consigo colectores de corriente por que lo que lo hace levitar y desplazarse es la interacción entre los dos campos electromagnéticos así que no tendrá problemas con los rodamientos y con la adhesión a la vía. (Ver Figura 4.51)

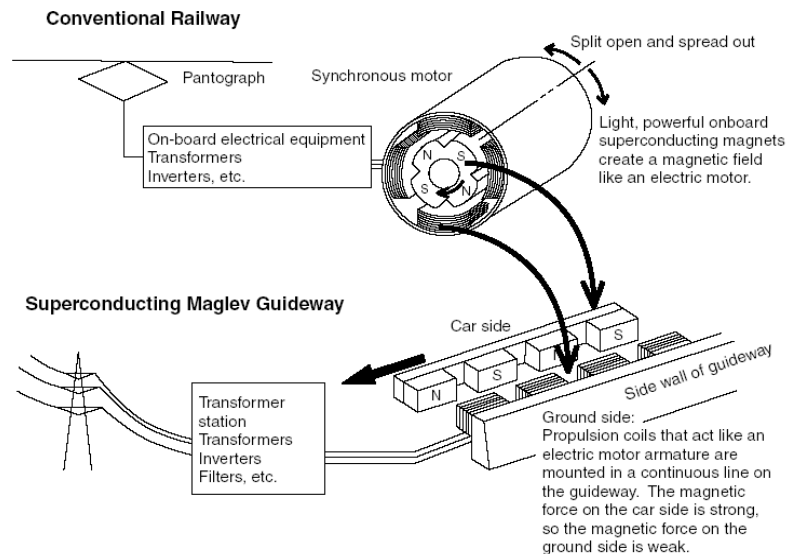


Figura 4.51 - Esquema de las instalaciones necesarias para el funcionamiento de un tren MAGLEV

Los imanes superconductores son utilizados para crear una gran fuerza magnética para propulsar el vehículo, pero también proporcionan mucho más que la simple propulsión. Ellos hacen levitar el vehículo, lo conducen entre los límites de la barda guía. Como podemos observar en la Figura 4.50b, las bobinas colocadas en las bardas guía, que están colocadas de frente una de la otra, tienen la misma polaridad magnética. Esto es debido a que están conectadas en la misma malla. Así cuando un vehículo con imanes superconductores se aproxima a alta velocidad y es desviado ligeramente hacia alguno de los costados, este inducirá una corriente más grande de lo normal en la bobina más próxima, lo que hará que se genere un campo electromagnético que repelerá al vehículo; y en la bobina de enfrente se generará un campo que tratará de atraer al vehículo hacia ese lado. Este fenómeno es el que hace que el vehículo de alta velocidad esté siempre en el centro de la guía. Los sistemas MAGLEV aprovechan al máximo el efecto estabilizador que se genera naturalmente dentro del sistema. Ya que, no son necesarios, complejos sistemas de control para mantener al vehículo dentro de la guía.

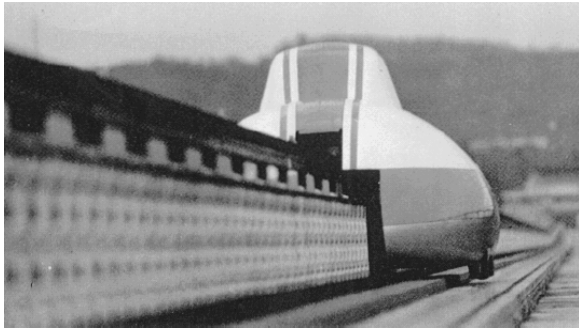


Figura 4.52 - Fotografía de un tren MAGLEV ML-500 que alcanzó una velocidad de 570 Km/h

Para propulsar al vehículo sobre la vía se utilizan los embobinados colocados en la barba guía para atraer y repeler el vehículo, en lo que es un motor lineal síncrono. Estos bobinados son alimentados con un sistema trifásico, creando una onda viajera en el campo magnético del estator y reaccionando con los imanes superconductores para hacer desplazar al vehículo (ver Figura 4.50c).

#### TRANSPORTE SUPERFICIAL DE ALTA VELOCIDAD (HSST)

#### TRANSPORTE SUPERFICIAL DE ALTA VELOCIDAD (HSST)

El desarrollo de los vehículos para HSST (*High Speed Surface Transport*) comenzó a principios de 1974 cuando Japan Airlines (JAL) comenzó a promover su nuevo sistema para vehículos que se basaba en un motor lineal. Esto coincidió con la construcción del nuevo aeropuerto de Tokio en Narita, que está a 60 kilómetros del centro de Japón, y que en ese tiempo se hablaba de un medio de transporte de alta velocidad que conectara a los dos aeropuertos. Japan Airlines para reducir considerablemente el tiempo de traslado y aprovechando la situación propuso la creación de un tren MAGLEV propulsado por motores lineales a 300 km/hr.

La diferencia básica entre los HSST y los MAGLEV es su sistema de levitación, pues mientras los sistemas MAGLEV utilizan imanes superconductores, los sistemas HSST utilizan electroimanes convencionales que ejercen grandes fuerzas de atracción para hacer levitar el vehículo. En la Figura 4.53 se muestra un esquema del sistema que hace levitar a los vehículos para HSST. Como se ve, los electroimanes están soldados al vehículo y ejercen una fuerza de atracción por debajo de los rieles guía de hierro, haciendo que se eleve el vehículo.

Para controlar la fuerza con la cual el electroimán es atraído hacia la barra guía se utiliza un sensor que mide el entrehierro existente (ver la Figura 4.53). El controlador regula el efecto de atracción por medio de una etapa de potencia en base a la medición del sensor y su valor de referencia es por lo general de 8mm. así si el entrehierro supera esos 8 mm. el controlador manda más corriente a la bobina del electroimán. Y si el sensor registra un entrehierro menor a los 8mm. el controlador mandará mucha menos corriente a la bobina. Esta acción es ejecutada 4000 veces por segundo por una computadora, que es la encargada de asegurar una estable levitación.

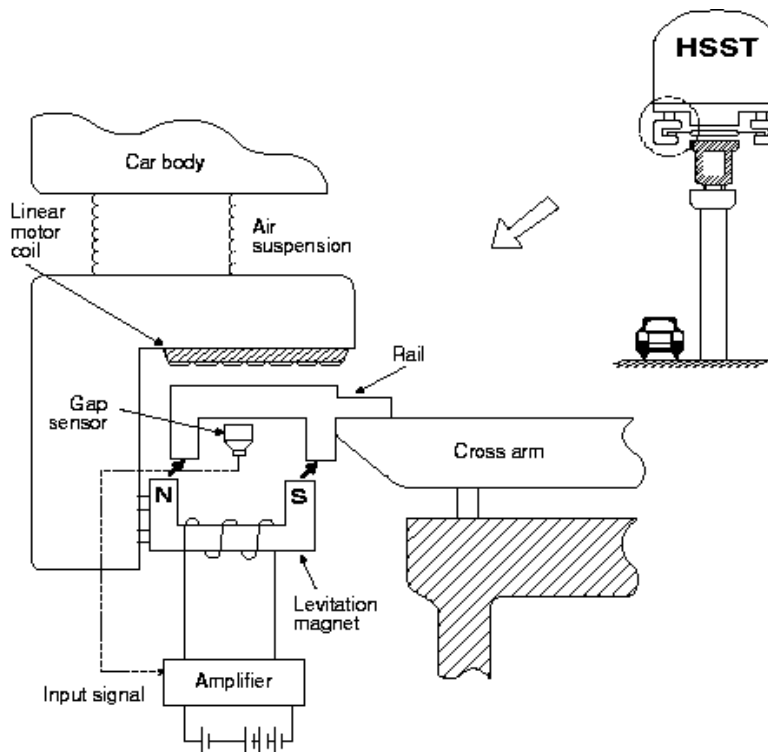


Figura 4.55 - Esquema que ilustra el principio de levitación de los sistemas HSST (transporte superficial de alta velocidad)

Como se observa (Figura 4.53) los electroimanes, así como las barras guía tienen forma de U, o U invertida en el caso de la barra, y con cada extremo de esa U apuntado al otro extremo de la otra U. Con esto, se evita que el vehículo se salga lateralmente de su guía, a pesar de que exista una fuerza de perturbación tienda a sacarlo de ella (una fuerza centrífuga, por ejemplo). Si a pesar de ello, el vehículo comienza a desplazarse lateralmente, existe un controlador que inyecta más corriente a la bobina, en función del desplazamiento generado, para que se incremente la fuerza y el vehículo regrese a su posición correcta.

Este innovador uso de una sola fuerza magnética para hacer levitar al vehículo y mantenerlo en su posición correcta, alineado en el centro de las guías, es una ventaja muy significativa de los sistemas HSST. Que hace superar las desventajas descritas anteriormente de los sistemas de levitación magnéticos por atracción.



Figura 4.56 - Tren HSST-100L en prueba de vía elevada en la ciudad de Nagoya

## APLICACIONES EN BAJA VELOCIDAD Y REPOSO

### APLICACIONES

#### EN BAJA VELOCIDAD Y REPOSO

Las aplicaciones en baja velocidad y reposo de los motores lineales son numerosas., en el manejo de partes, procesos de transformación de materia, transporte de materiales, acondicionamiento, etc. En la Figura 4.57 se observa una aplicación en el procesamiento de hojas de metal. Otras de las aplicaciones es el tensionado de una banda de aluminio para embobinarla .

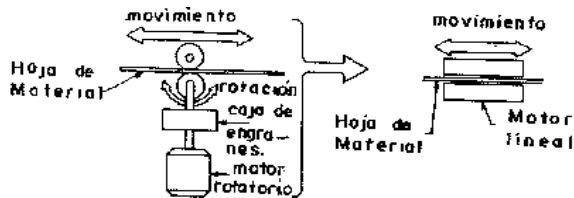


Figura 4.57 - Esquema de una aplicación de manejo de hojas de metal, substituyendo un motor rotatorio por uno lineal.

El empuje de un MIL contra el movimiento de la banda proporciona una tensión la cual se aplica sin contacto. Así se evitan las rayaduras de la superficie, generalmente se usan nueve MsIL de doble cara y se usan hojas de aluminio (o banda), las cuales constituyen el secundario para la aplicación, el espesor de las hojas de aluminio está entre 0.5 y 1.4 mm, y cada MIL tiene un empuje de 60N.

Otra aplicación es la de transporte de material. Se puede observar que para aplicaciones de transporte horizontal de bloques de acero como se muestra en la Figura 4.58 , los primario de los MIL son colocados a intervalos, dependiendo de la longitud del material a transportar, dando simplemente un empuje, son transportados con velocidad variable si se desea.

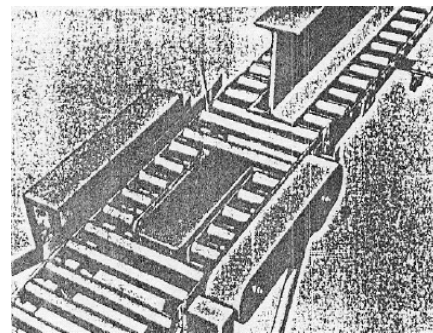


Figura 4.58 - Un motor lineal que impulsa barras de metal para ser transportadas en la línea.

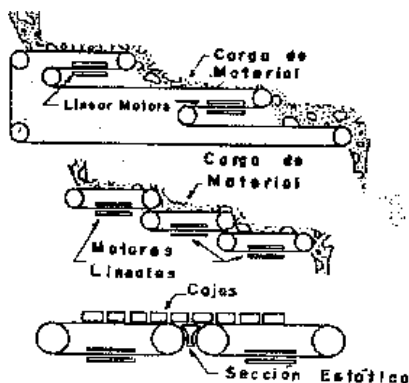


Figura 4.59 - Motores lineales aplicados en la transportación de carbón

Otra aplicación de transporte de materiales es para la de transportación de carbón en las minas, o en algún proceso de la industria. Esta aplicación utiliza un conjunto de motores lineales de inducción de doble cara y los cuales están espaciados cada tres metros y el entrehierro es al rededor de 5 milímetros, el primario es alimentado con 10Hz para obtener un rango de velocidad de 2 a 5 metros por segundo. El motor tiene un empuje de arranque de 8.4KN y un empuje continuo de 4KN. Ver Figura 4.59

Otro uso de los motores lineales, ya sea de inducción o tubular es como actuador en un puerta automática de ascensor. Un motor lineal normal de 21cm de largo y 9 cm de ancho se puede usar también como actuador para abrir y cerrar ventanas en un edificio inteligente.



Figura 4.60 - Un centro de maquinado que utiliza 5 motores lineales

También los motores lineales son usados en máquinas herramientas, los centros de mecanizado verticales de precisión DMC 105 V y DMC 75 V, de la serie DMC V lineal de DMG America, cuentan con motores lineales en todos los ejes para alcanzar aceleraciones hasta de 2 g y velocidades de recorrido hasta de 3.543 ipm. Son usados en la fabricación de herramientas y moldes. Estas máquinas tienen una estructura robusta en fundición y sistemas de medición directa del patrón, lo que entrega gran precisión de los contornos y alta calidad de la superficie. Además, integran un motor de torsión al eje B para expandir la máquina a un centro de mecanizado simultáneo en cinco ejes.

Los motores lineales también se aplican en automatización, creación de diversos robots para diversos tipos de aplicaciones, como el ensamble de tarjetas electrónicas; la ejecución de procesos de muestreo en procesos de calidad; o en la producción de proteínas, hormonas, etc. Uno de esos robots es el Megamation, que es un robot diseñado para la industria farmacéutica y realiza un proceso de HTS (high-throughput screening) y utiliza dos motores lineales bidimensionales para posicionar las cepas y el otro para posicionar los instrumentos. Enseguida se presenta una fotografía de ese sistema (figura 5.61).



Figura 4.61 - Robot Megamation, diseñado para la industria farmacéutica y realiza un proceso de HTS, utiliza dos motores lineales bidimensionales para posicionar las cepas y el otro para posicionar los instrumentos

## APLICACIONES COMO MÁQUINAS DE ENERGÍA

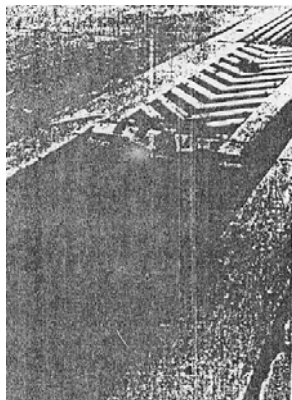


Figura 4.62 - Un motor lineal utilizado para propulsar aeronaves a gran velocidad en un portaaviones.

## APLICACIONES COMO MÁQUINAS DE ENERGÍA

Una de las aplicaciones más antiguas de los MIL fue como una máquina de energía para lanzar aeronaves. En los portaaviones existe la necesidad de impulsar los aviones cazas a grandes velocidades, debido a que la pista es demasiado corta y los aviones no pueden alcanzar la velocidad necesaria para elevarse. Para dotar de toda esa energía a los aviones se utilizó un motor lineal. El devanado primario fue montado sobre un carro, y el secundario consistía de un devanado en ranuras en una estructura ferromagnética (ver Figura 4.62). Se construyeron dos vías con una longitud de 5/8 de milla. La colección de corriente fue por medio de escobillas colocadas a lo largo de los miembros secundarios. El motor desarrolló 10,000 HP y alcanzó velocidades que exceden los 225 mph. Un jet de 10,000 lb. de peso fue acelerado a 117 mph a una distancia de 540 pies en 4.2 seg. desde el reposo. El sistema finalmente fue abandonado por su alto costo.

Actualmente se están desarrollando varios proyectos de desarrollo de una catapulta electromagnética, EMCAT por su siglas en inglés. Hoy en día esa tecnología está en proceso de ser trasladado de los laboratorios de física a un problema de ingeniería. Los sistemas EMCAT tienen un gran costo beneficio ya que tienen una larga vida y requieren de poco mantenimiento, pero hasta este momento han presentado la necesidad de mejorar el desempeño de empuje y habrá que reducir el peso, volumen y logística necesaria para su funcionamiento. La compañía DERA ha probado un motor lineal de 90MW y 300 pies; y ha acelerado un avión de 100,000 libras a 130 nudos en 45 segundos.



Figura 4.63 - Los sistemas EMALS utilizan motores lineales para impulsar a las aeronaves por la borda del portaaviones

Otro sistema de propulsión de aviones es el sistema electromagnético de despegue de aviones, EMALS (Electromagnetic Aircraft Launch System). Se visualiza que los EMALS tengan un mejor desempeño y control de lanzamiento. Podrán acelerar aviones de entre 4.5 a 45 toneladas a una velocidad de entre 100 y 370 km/hr. El corazón de este sistema es su motor de inducción lineal de 103 metros de longitud, que impulsa al deslizador con la aeronave amarrada a éste. La energía es suministrada

por los generadores internos del portaaviones, la cual pasa por un inversor que utiliza modulación PWM, para suministrar una corriente de alta frecuencia al motor lineal. Este sistema tiene un controlador que opera en un lazo cerrado asegurándose de dar las condiciones de empuje y velocidad indicadas para cada tipo de aeronave propulsada.

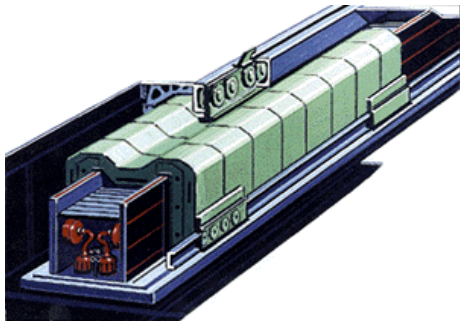


Figura 4.64 - Esquema de un motor lineal de inducción utilizado como catapulta en los portaaviones.

Como ventaja los sistemas EMALS tienen una gran flexibilidad en cuestión del control de las condiciones, además de que tienen casi la mitad de peso y peso que las catapultas impulsadas por vapor. También se espera que para el mantenimiento a los sistemas eléctricos y electrónicos de los EMALS se requieran cerca del 70% de los que son requeridos para los sistemas de vapor.

Otra de las aplicaciones de los MIL son como máquinas de energía incluyendo los aceleradores para proyectiles a muy altas velocidades y desconectores en circuitos de alto voltaje.

Los MIL también se han desarrollado para disimular las condiciones de choque de los automóviles. Un MIL es capaz de acelerar vehículos no más pesados de 10,000 lb. hasta velocidades de 40 mph. o menores, las cuales han sido usados como fuerza motriz para impulsar el vehículo

Un impacto típico de un auto contra un muro es mostrado en la Figura 4.66, en donde se utiliza un motor lineal como motor de energía para impactar el automóvil en contra de una pared. El primario de ese motor tiene una estructura en forma de "U" invertida conteniendo los dos devanados de los bloques, a uno y otro lado del secundario. La corriente es alimentada al primario por medio de escobillas de carbón, las cuales recolectan de los rieles la energía a todo lo largo del recorrido, además de ser montadas y aisladas sobre el primario. A nivel del piso sobre la parte alta del componente en movimiento, está un enganchador con el cual el vehículo de prueba es atado.

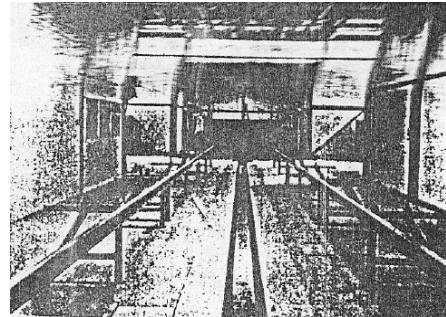


Figura 4.65 - Vía donde corre el auto para ser impactado, se puede apreciar el devanado primario del motor lineal en el centro de la vía.



Figura 4.66 - Un automóvil que es impulsado por un motor lineal para simular las condiciones de choque.

Otra de las aplicaciones Los primarios de las máquinas de energía se usan para dar forma a metales conductores en la parte final del proceso. Por ejemplo, en los listones fusibles de plata limitadores de grandes corrientes, los fusibles on unidos al casquillo por contracción magnética al rededor del cilindro.



## REFERENCIAS

- [1] Cruz G. Iselda y Dueñas M. Salvado. **MOTORES LINEALES**, Tesis Esime-zacatenco. México, 1993.
- [2] Irving L. Kosow, **MÁQUINAS ELÉCTRICAS Y TRANSFORMADORES**. Segunda edición. Pearson Education. ISBN:968-880-293-X.
- [3] Chester L. Dawes, **TRATADO DE ELECTRICIDAD, TOMO SEGUNDO, CORRIENTE ALTERNA**. Ediciones G. Gili, S.A. de C.V. México, D.F. 1991.
- [4] Stephen J. Chapman, **MÁQUINAS ELÉCTRICAS**. Tercera edición.
- [5] Roberto Herrera Charles<sup>1</sup>, Luis Pastor Sánchez Fernández, **MÉTODO DE CONTROL AUTOMÁTICO DE GENERACIÓN DE OLEAJE IRREGULAR PARA LABORATORIOS DE INVESTIGACIÓN, UTILIZANDO MOTORES LINEALES**. Centro de Investigación en Computación – IPN.
- [6] J. Wolff, G. Gómez, **EL MOTOR DE RELUCTANCIA CONMUTADO - UN MOTOR ELÉCTRICO CON GRAN PAR MOTOR Y POCO VOLUMEN**. Energía - julio/agosto 1997, No 4, pág. 113-115.
- [7] Rohner, Ronald, **LINEAR MOTORS HAVE THEIR DAY IN INDUSTRIAL APPLICATIONS**. Design Engineering. Toronto: Apr 1999. Vol. 45, Iss. 4; pg. 18.
- [8] **APPLYING LINEAR MOTORS IN MATERIAL HANDLING**, Machine Design; Jan 26, 1989; 61, 2; ABI/INFORM Global, pg. 91.
- [9] Catálogo: **MOTORES LINEALES LMS, DTL, Y GTL**, Capítulo tres. SAIN, Solidgess Automatización Industrial, Caldes de Malavella (Girona).
- [10] Thomas E. Kissell, **LINEAR STEPPER MOTORS**. Industrial Electronics, Prentice Hall PTR.
- [11] **TUTORIAL SOBRE MOTORES PASO A PASO (STEPPER MOTORS)**. <http://www.todorobot.com.ar/informacion/tutorial%20stepper/stepper-tutorial.htm>
- [12] **APPLICATION OF LINEAR MOTORS To Machine Tools**. Shinko Electric Co., Ltd. <http://www.shinko-elec.co.jp/eng/techlink/vo4.htm>
- [13] Jack Barrett / Tim Harned / Jim Monnich, **LINEAR MOTOR BASICS**. Parker Hannifin Corporation.
- [14] **PRINCIPLE OF MAGLEV**. Railway Technical Research Institute. [http://www.rtri.or.jp/rd/maglev/html/english/maglev\\_principle\\_E.html](http://www.rtri.or.jp/rd/maglev/html/english/maglev_principle_E.html). 21 de mayo de 1997
- [15] Kanji Wako / Kazuo Sawada. **MAGNETIC LEVITATION (MAGLEV) TECHNOLOGIES**. Railway Technology Today 12
- [16] Richard Beedall, **FUTURE AIRCRAFT CARRIER - CVF, QUEEN ELIZABETH CLASS, PART 25**. Navy Matters. <http://navy-matters.beedall.com/cvfl-25.htm>
- [17] **IEEE, REFERENCE GUIDE: IEEE STYLE**. April 10, 1998.
- [18] Jacek F. Gieras, Zbigniew J. Piech; **LINEAR SYNCHRONOUS MOTORS TRANSPORTATION AND AUTOMATION SYSTEMS**; CRC Press