

## **Motor lineal**

### **1.- Generalidades.-**

El motor lineal como concepto básico al igual que la mayoría de las máquinas eléctricas data de fines del siglo pasado. Existe una patente de motor lineal fechada en el año 1889.

Pese a tener antecedentes tan remotos no ha tenido un desarrollo muy significativo en la primera mitad de este siglo y esto se debe a que se bien posee algunas ventajas significativas existen algunos inconvenientes que desalientan su utilización. Básicamente el motor lineal está formado por una parte fija y una parte móvil de construcción adaptada a las características a obtener, la cual transmitirá la fuerza requerida entre ellas sin intervención de transmisiones.

El principio de funcionamiento del motor lineal permite obtener una forma de conversión de la energía cuyas ventajas se imponen en forma determinante en todos los sectores en donde están en juego fuerzas para traslación; el motor lineal provee por sí mismo un esfuerzo de propulsión sin ningún medio de transmisión mecánica y con solamente el vínculo electromagnético entre las partes fijas y móviles. De esta forma se elimina el recurso clásico de transformar el movimiento de rotación del motor convencional en un movimiento lineal eliminando los conocidos problemas de los sistemas de transmisión y de adherencia en las ruedas motrices. El principal inconveniente radica en el hecho de que es más difícil mantener las distancias entre inductor e inducido que en los motores rotantes, y vale la pena recordar que el entrehierro es lo que demanda la mayor intensidad de campo para lograr la inducción necesaria. Los motores lineales tienen por lo general mayor tamaño y menor rendimiento que los motores rotantes de igual potencia.

Es fácil deducir que a pesar de su costo todavía demasiado elevado, estos tipos de motores permiten resolver diversos problemas ya sea en el campo del transporte como en de las máquinas herramientas.-

### **2.- Tipos de motor lineal.-**

La analogía que existe entre los motores rotantes y los motores lineales conduce obviamente a concebir las mismas familias de motores las cuales son:

- los motores de corriente continua,
- los motores sincrónicos
- los motores asincrónicos

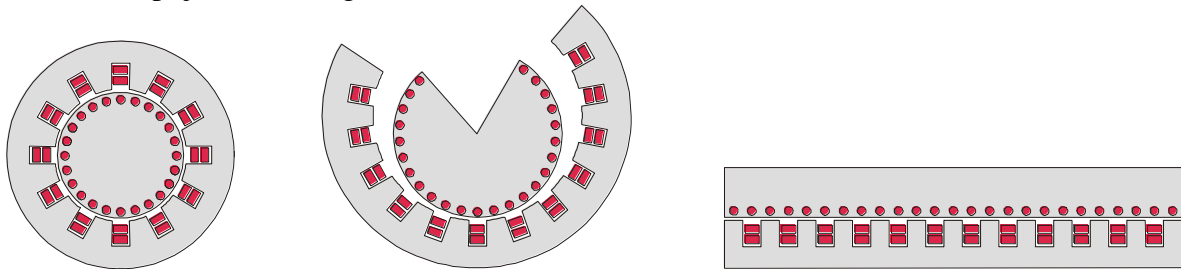
La dificultad causada por los contactos rozantes, conducen a preferir en la mayoría de los casos el motor lineal del tipo asincrónico

### **3.- Motor lineal asincrónico**

Consideraremos las soluciones previstas para la realización tanto del inductor como del inducido con referencia particular a la elección del tipo de bobinado y del número de fases.

El motor lineal de inducción puede derivarse de un motor de inducción normal, cortándolo axialmente y considerando un sector plano del estator (o primario) y del rotor (o secundario), como si fuera motor asincrónico cuyo rotor tiene un radio infinito,

por lo cual el movimiento del campo magnético, siendo rotante con radio infinito, se transforma en lineal. El campo magnético rotante se transforma en consecuencia en un campo magnético de translación, y en lugar de un par electromagnético se tiene una fuerza o empuje electromagnético.



*figura 1*

Con el motor lineal, que representa, como se explicará a continuación, una verdadera cremallera magnética, se puede obtener propulsión directa sin ningún vínculo mecánico.

Los inducidos se clasifican en: inducidos con hierro (que da una fuerza de atracción entre el inductor e inducido) y sin hierro (que reacciona con el inductor solo por los efectos electrodinámicos).

Además se puede hacer otra clasificación según la forma del entrehierro. Los motores lineales pueden ser de **entrehierro plano** cuya aplicación es el transporte y los de **campo arrollado** o (tubulares) que se desarrollan como máquinas de accionamiento de cortos recorridos (no se usa en transporte por el costo). También se puede emplear el motor lineal como accionamiento de metal fundido pero con un rendimiento muy bajo.

### **3.1.- Motor lineal de entrehierro plano.-**

#### **3.1.1.- Parámetros principales.**

Los parámetros principales de un motor asincrónico lineal son:

- la velocidad
- la fuerza en régimen nominal
- la construcción mecánica del inductor y del inducido.(esto define muchas características del motor)
- la variación de la fuerza en función de la velocidad.

#### **3.1.2.- Velocidad**

A pesar de la analogía existente entre el motor asincrónico rotante y el motor lineal, existe una diferencia entre estos dos tipos de motor.

Mientras en el motor rotante la velocidad sincrónica angular esta dada por la frecuencia y por el número de polos, en el motor lineal la velocidad sincrónica lineal está determinada por el paso polar y por la frecuencia:

donde:

$$V_s = 2 \cdot P_p \cdot f$$

$V_s$  = velocidad sincrónica en metros por segundo

$P_p$  = paso polar en metros

$f$  = frecuencia de alimentación.

Por consiguiente el número de polos no interviene en la determinación de la velocidad y es por lo tanto de libre elección. La velocidad lineal podrá tener un valor cualquiera pero a cada velocidad corresponderá una ejecución especial del circuito magnético.(longitud del paso polar).

Aunque el número de polos no intervenga en la velocidad sincrónica del móvil, interesa elegir ese número lo mas alto posible para disminuir la importancia relativa de las pérdidas suplementarias en el extremo del circuito. El cálculo y la experiencia indican que a partir de un número de polos igual a ocho, estas pérdidas se vuelven aceptables para motores de media y baja potencia. La longitud mínima del motor será por lo tanto:

$$l = 8 \cdot P_p \quad \text{o también} \quad l = \frac{4 \cdot V_s}{f}$$

Para velocidades elevadas (superiores a los 20 m/seg.) la longitud del motor se hace importante y a veces prohibitiva. Será bastante ventajoso aumentar la frecuencia de alimentación para mantener las dimensiones mecánicas compatibles con los órganos a traccionar, sobretodo si la instalación comprende varios motores.

Para velocidades bajas (inferior a 2 m/seg.) se podrá elegir libremente el número de polos lo suficientemente elevado para asegurar el rendimiento; en la reducción de la velocidad (a partir de los 2 m/seg.) aparece la dificultad tecnológica de la fabricación (particularmente por los laminados y por los bobinados). Para evitar estos inconvenientes se podrá recurrir a una alimentación a frecuencia distinta de la de la red (frecuencia inferior)

Una ejecución particular del motor lineal es aquella en que su velocidad sincrónica varía durante el recorrido. Para esta ejecución se debe realizar un paso polar variable para obtener una aceleración o desaceleración continua del móvil. En estos casos también es posible usar frecuencia variable.

También es posible la construcción de un motor rotante en el cual la velocidad es independiente del número de polos. Con este objetivo se utiliza un rotor de construcción apropiada y se lo conecta a un excitador parcial como el de un motor lineal. (fig. 2) Este tipo de máquina tiene una potencia relativamente débil en relación a su masa y su empleo es interesante solamente para pequeñas potencias cuando se pretende evitar las reducciones mecánicas o no se puede tener acceso al eje físico de la rueda a impulsar.

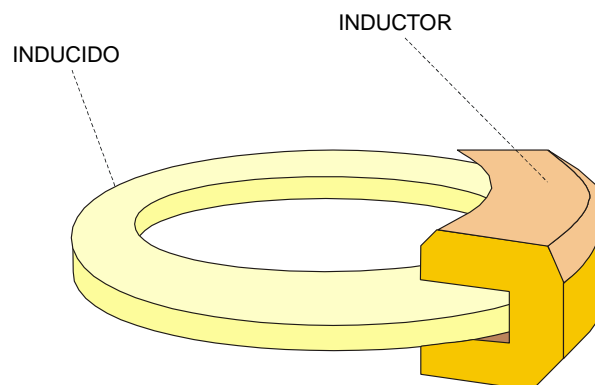


figura 2: Motor rotante con velocidad independiente del número de polos

### 3.1.3.- Fuerza

La fuerza es para una inducción dada, proporcional a la superficie del móvil en el campo.

Una vez definida la longitud del inductor queda por elegir el ancho activo para obtener la fuerza. Esta elección depende de la característica de la fuerza en función de la velocidad, aunque la naturaleza del inducido podrá tener también una influencia determinante.

### 3.1.4.- Distancia entre el inductor e inducido

En el motor rotante el valor del entrehierro es elegido por el constructor en función de las características mecánicas de la máquina y es prácticamente independiente de la máquina traccionada.

En el motor lineal las condiciones mecánicas de la máquina a impulsar imponen, en la mayoría de los casos, un juego que conduce a un entrehierro importante desde el punto de vista electromagnético. El volumen del motor está ligado directamente a este entrehierro, por lo que se pone el máximo interés en reducir tal juego al valor mecánico estrictamente mínimo.

### 3.1.5.- Construcción del inductor

Al tratarse de una máquina de corriente alterna el núcleo magnético del inductor se construye con chapas magnéticas.

El modo de asentamiento y los elementos que constituyen el soporte del inductor, varían según el tipo de arrollamiento y según los problemas que interesa resolver.

#### 3.1.5.1.- Elección del arrollamiento inductor

La elección del arrollamiento depende del dimensionamiento geométrico del inductor. El arrollamiento clásico utilizado en los motores asincrónicos (fig. 3) presenta un inconveniente importante.

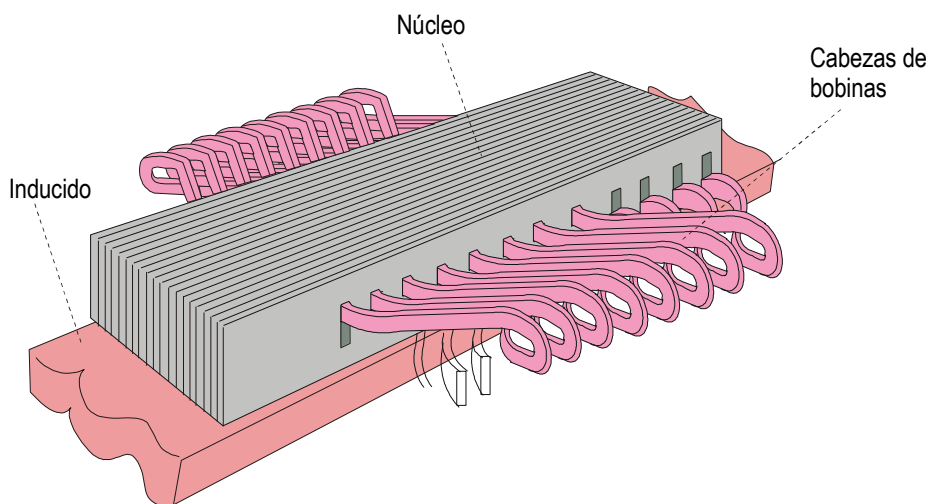
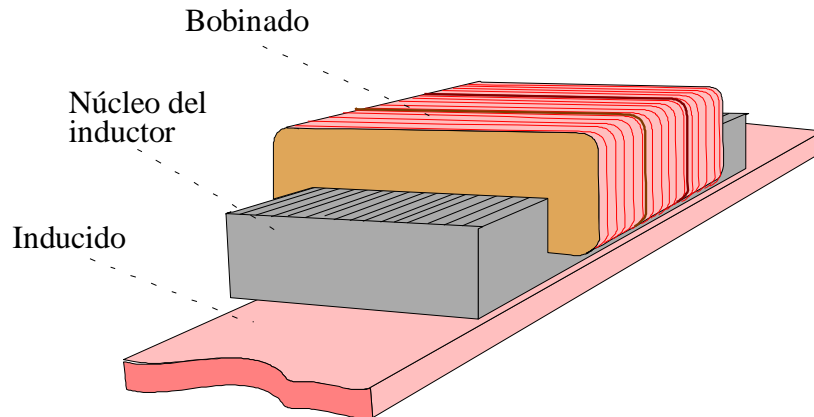


figura 3 .- Arrollamiento clásico

En efecto las dimensiones de las cabezas de bobina crece rápidamente con el paso polar y por lo tanto con la velocidad. En consecuencia la dispersión y las pérdidas por efecto Joule aumentan.

El arrollamiento en anillo (fig. 4) permite reducir en un modo muy apreciable la longitud total del conductor pero aumenta la altura del inductor.



*figura 4.- Arrollamiento en anillo.-*

### **3.1.6.- Elección de la naturaleza del inducido**

Los distintos tipos de inducidos se pueden clasificar en dos categorías que reaccionan en forma distinta con el inductor:

1. los móviles con hierro que dan una fuerza de atracción magnética entre inductor e inducido;
2. los móviles sin hierro que reaccionan con el inductor solamente por los efectos electrodinámicos.

En cada uno de estos dos tipos se encuentra diversas clases de móviles y muchas estructuras de motores lineales.

#### **3.1.6.1.- Inducido con hierro**

A esta clase pertenecen tres tipos de inducidos con diversas características, particularmente desde el punto de vista de la fuerza magnética entre inductor e inducido y de la tracción en función de la velocidad.

Estos son:

1. inducidos totalmente en hierro, magnéticamente isotrópicos;
2. inducidos mixtos construidos en un conjunto de dos partes isotrópicas, de las cuales una es magnética y la otra conductora;
3. inducidos tipo jaula (o bien tipo escalera) donde las barras conductoras están dispuestas en un paquete de laminado magnético en una disposición análoga a la "jaula de ardilla" en un motor rotante.

Con los inducidos mencionados es posible recurrir a un solo inductor. En esta ejecución aparece una fuerza magnética unilateral de atracción no compensada entre el inductor y el inducido, que requerirá la presencia de un robusto dispositivo de guía para evitar rozamientos. Esta fuerza es variable en función de la naturaleza del inducido mas que del valor del entrehierro.

La atracción magnética es mas débil con inducido mixto porque el entrehierro magnético será en tal caso mayor que en los otros tipos de inducido, ya que el mismo comprende el espesor de la plancha conductora.

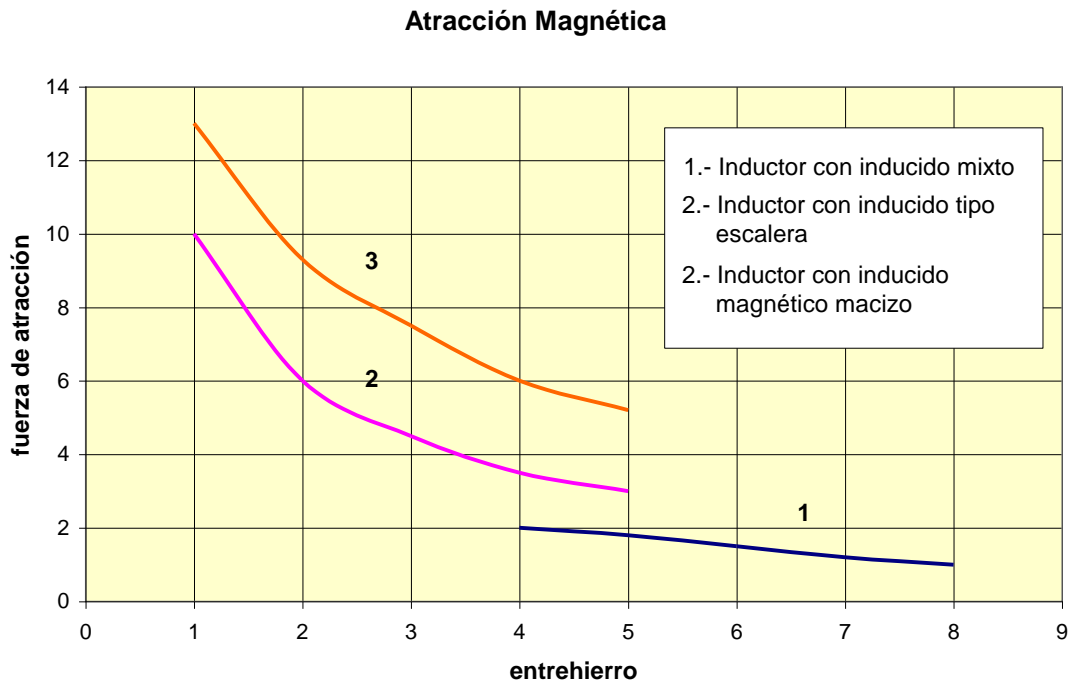


figura 5.- Valores de relación entre atracción magnética y fuerza máxima en función del entrehierro

Los valores de relación entre atracción magnética y fuerza máxima para los distintos tipos de inducido, se indican en función del entrehierro y de las características de los mismos en la fig 5.

En primera instancia esta fuerza de atracción puede parecer perjudicial, pero a veces puede ser utilizada, por ejemplo para aumentar la adherencia.

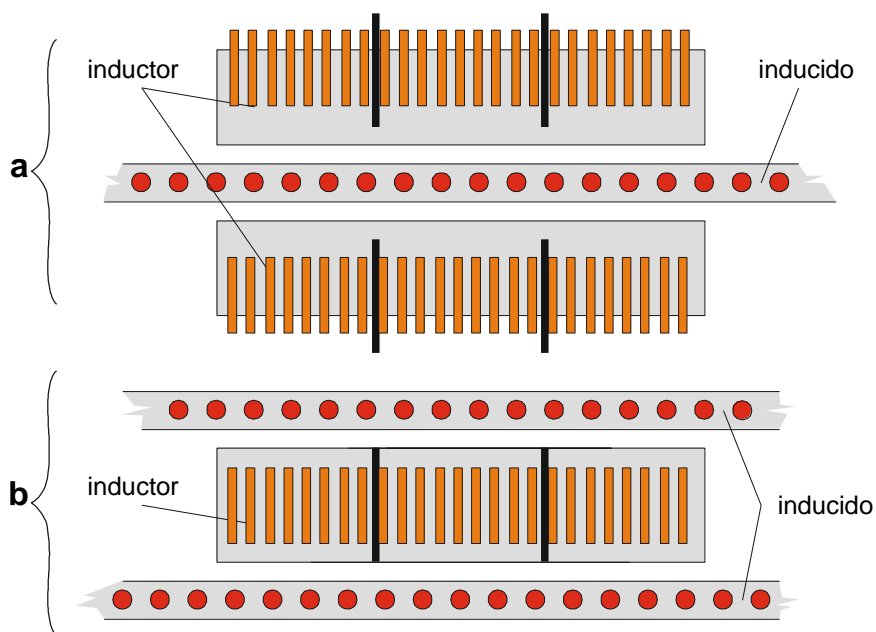


figura 6 -. a) doble inductor b) doble inducido

Con una estructura que presenta dos inductores a un lado y al otro del inducido o también con un solo inductor y dos inducidos, las fuerzas de atracción se compensan, siempre y cuando el sistema sea rigurosamente simétrico. (fig. 6) La fuerza diferencial será más débil que la atracción unilateral.

### 3.1.6.2.- Inducido sin hierro.

Estos inducidos están formados por un conductor isótropo no magnético como por ejemplo el cobre, el aluminio o cualquier conductor no magnético.

La estructura del motor será de dos inductores o sino de un inductor y un yugo de cierre del flujo.( fig 7)

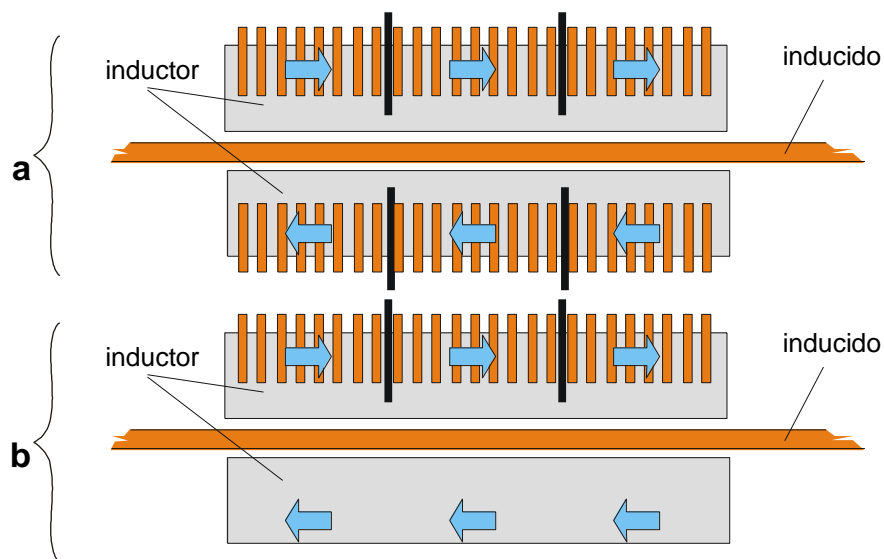


figura 7.- a) doble inductor b) inductor simple

Entre el inductor y el inducido no habrá fuerza magnética, solamente aparecerán los esfuerzos electrodinámicos de repulsión. En cambio aparecerá una atracción magnética entre los inductores lo que implicará la necesidad de recurrir a un montaje mecánico particularmente sólido, para conservar a los inductores paralelos y a su distancia.

### 3.1.6.3.- Característica de la tracción en función de la velocidad.

En la fig. 8 se puede apreciar que para una tracción dada, la velocidad de funcionamiento será inferior con inducido magnético isótropo.

El resbalamiento supera a menudo el 50 % y la variación de velocidad en función de la carga es muy importante.

Con el secundario tipo escalera el resbalamiento puede ser muy bajo y la carga tendrá poca influencia en la velocidad.

Modificando la naturaleza del metal conductor, la característica puede variar su pendiente y la tracción máxima puede ubicarse en correspondencia con una velocidad cualquiera.

En el inducido mixto la variación del espesor de la plancha conductora y la naturaleza de esta última permiten obtener esta curva con más o menos pendiente.

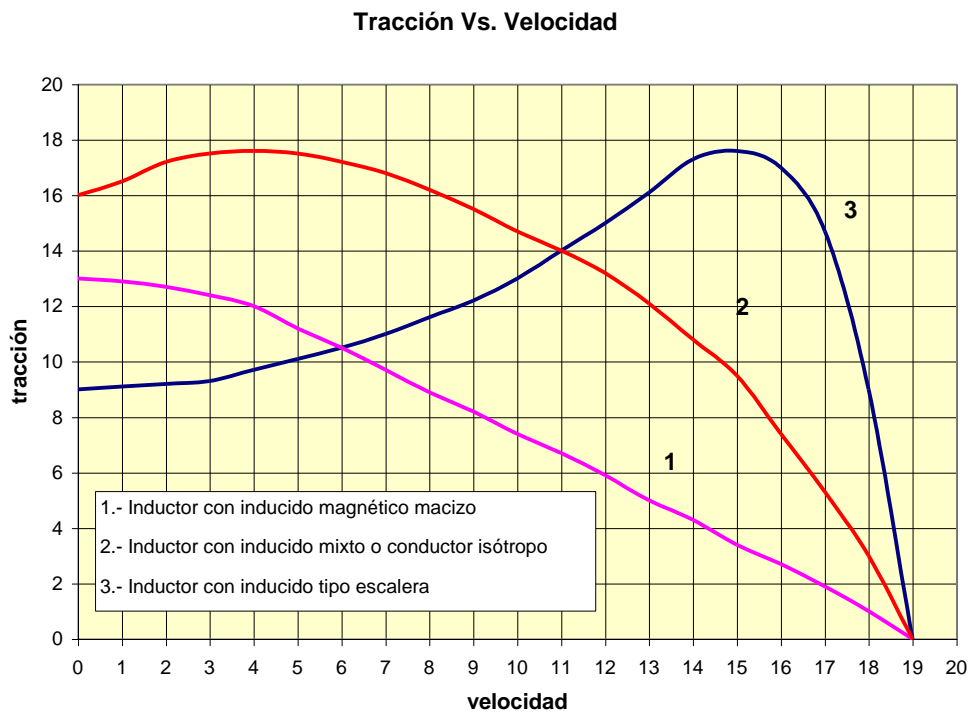


figura 8.- Característica de la tracción en función de la velocidad

Con inducido sin hierro la característica tracción Vs. velocidad es similar a la de inducido mixto.

### 3.1.6.4.- Características en función de la forma constructiva.

En el motor lineal el rendimiento y el factor de potencia serán menores a paridad de potencia, que los correspondientes a un motor asincrónico rotante.



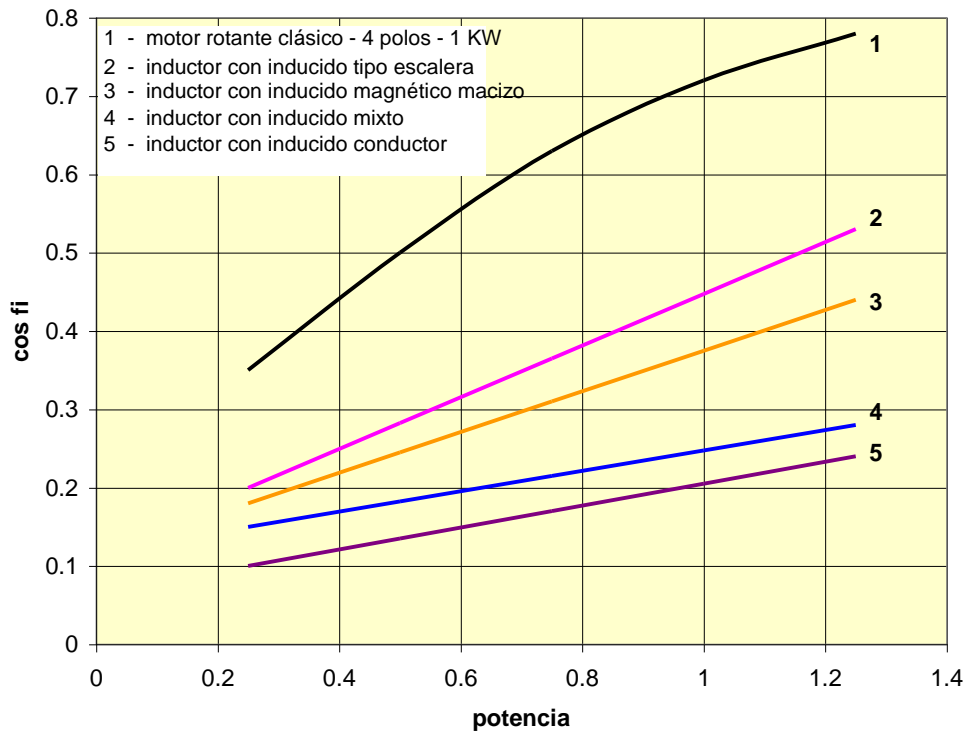


figura 9.- Factor de potencia en función de la potencia.-

Los valores del factor de potencia pueden resultar inferiores al límite fijado para las redes de distribución. En efecto, el factor de potencia está estrechamente ligado a la elección del tipo de inducido y a la distancia entre el inductor y el inducido.

La fig. 9 indica la reducción que puede producirse entre los valores de factor de potencia de un motor rotante asincrónico normal (1 KW - 4 polos) y los de distintos tipos de motores lineales de la misma potencia.

En la ejecución con inducido de hierro macizo o bien con hierro laminado con conductores tipo escalera, el valor del entrehierro será siempre mayor que el de un motor rotante equivalente.

El aumento del entrehierro induce a modificar la geometría de las ranuras del inductor que deberán ser mayores. Estos dos factores producirán en consecuencia una importante reducción del factor de potencia.

En la ejecución con inducido mixto, el entrehierro es igual a la distancia mecánica entre el inductor y el inducido más el espesor del estrato conductor. En este tipo de realización el factor de potencia es más débil que en los dos tipos de ejecución precedentes.

Con el inducido únicamente conductor el valor de factor de potencia es aún más reducido.

El rendimiento también varía con el tipo de inducido. En comparación con el motor rotante el rendimiento será inferior debido a la pérdida en los extremos y variará en función del número de polos ya que al aumentar el número de polos se reducen porcentualmente las pérdidas suplementarias en los extremos.

La fig. 10 representa la reducción del rendimiento entre los motores asincrónicos rotantes normales (1Kw - 4 polos) y los distintos tipos de motores en ejecución lineal.

Estas características indican que el rendimiento es más elevado con el inducido tipo escalera.

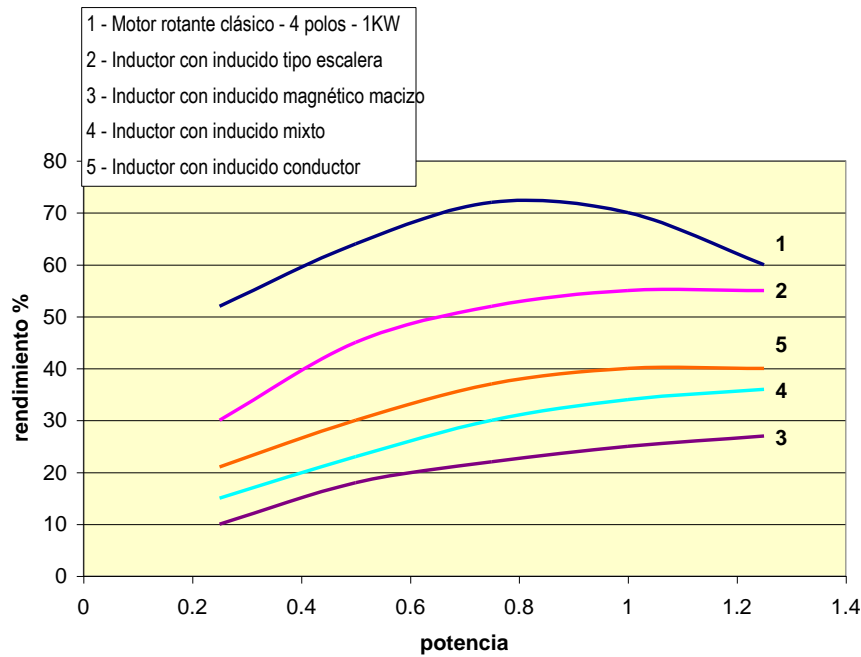


figura 10 - Rendimiento en función de la potencia

Se puede mejorar el rendimiento mediante la utilización de una mayor cantidad de material, lo que obviamente implica un aumento de peso y de precio.

### 3.1.6.5. - Peso del inductor en función del tipo de inducido.

La tabla siguiente indica la masa de los inductores de diversos motores lineales alimentados a 50 Hz y con las siguientes condiciones:

- 1 - teniendo la misma potencia útil
- 2 - teniendo la misma velocidad a carga nominal (asegurando por consiguiente la misma fuerza a carga nominal)
- 3 - para distintos tipos de inducido en comparación con la masa de un motor rotante estandarizado de 4 polos de la misma potencia, alimentado a 5 Hz.

En esta tabla la masa del motor estandarizado se toma como unidad. Para los distintos motores lineales, la masa considerada comprende solo la del inductor.

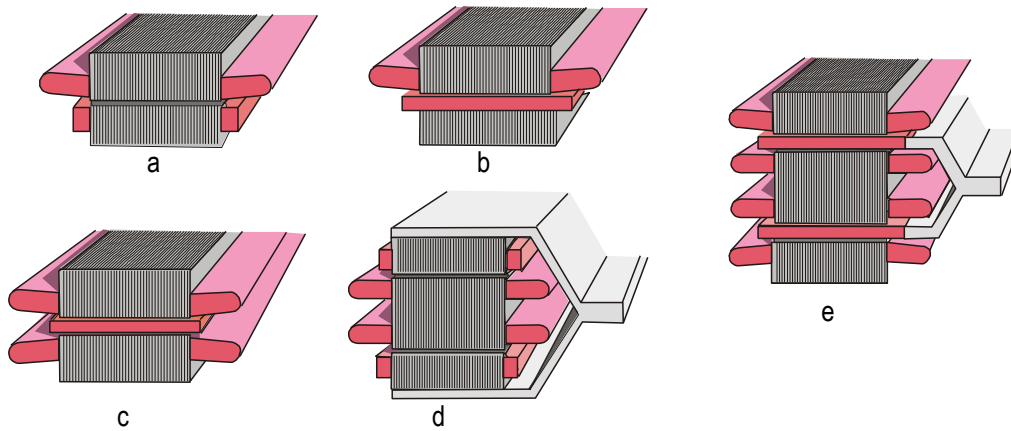
Tipo de inductor	Masa en comparación con el motor estandarizado.
Motor asincrónico estandarizado tetrapolar	1
Inductor acoplado a inducido laminado, tipo escalera	3,5
Inductor acoplado a inducido mixto	10
Inductor acoplado a inducido conductor	9
Inductor acoplado a inducido magnético macizo	13,5

### 3.1.7.- Disposición general y constitución.

El motor lineal puede ser:

- a) de inductor largo con inducido corto (válido en general para aplicaciones que requieren pequeños desplazamientos y aceleraciones importantes)
- b) de inductor corto con inducido largo (para movimientos de gran amplitud).

En cualquiera de estos casos se pueden colocar inducido e inductor de distintas formas según la naturaleza del inducido, del arrollamiento del inductor, del espacio disponible y del movimiento a realizar.



- a – 1 inductor – 1 inducido tipo escalera*
- b – 1 inductor – 1 inducido mixto*
- c – 2 inductores – 1 inducido conductor isótropo*
- d – 1 inductor – 2 inducidos tipo escalera*
- e – 3 inductores – 2 inducidos conductores isótropos*

*figura 11. Distintos tipos de montajes de inductor e inducido*

Con el inducido en hierro, se pueden colocar: un inductor y un inducido contrapuestos cara a cara, dos inductores con un solo inducido, o también un solo inductor y dos inducidos.

La figura 11 muestra los distintos tipos de montaje de los elementos inductor e inducido.

La forma constructiva de un motor lineal es muy diversa y dependerá fundamentalmente de la aplicación del motor. Los factores a tener en cuenta en el diseño de un motor lineal son:

- 1) el movimiento a realizar:
  - si es pequeño o de gran amplitud;
  - si existe inversión o movimiento continuo;
  - si es rotante o rectilíneo;
- 2) la longitud a equipar, a fin de determinar el costo mínimo de primario y secundario según la importancia del desplazamiento;
- 3) el espacio disponible en alto ancho y largo;
- 4) el órgano a comandar (si se puede por ejemplo integrar el inducido en este último);
- 5) la prestación: velocidad, aceleración, tracción mínima, variación admisible de la velocidad para una variación de carga, inercia a impulsar o frenar;
- 6) el ciclo de funcionamiento: factor de funcionamiento, número horario de impulsión o inversión.

### **3.1.8.- Ejemplos de aplicación.**

Pese a que es una máquina de menor rendimiento que las rotantes y aparentemente de mayor costo, es muy usada por el hecho de evitar la transmisión mecánica.

El motor lineal tiene aplicación en el campo del transporte, de las máquinas herramientas, de los transferts en las líneas de fabricación, de los aceleradores y de los frenos.

Los movimientos de traslación pueden clasificarse en tres categorías:

- movimientos continuos de gran amplitud (en esta categoría entran los transportes, cintas transportadoras etc.)
- movimientos de pequeña amplitud con velocidad y posicionamiento controlado, comando de elementos de máquinas, puertas, etc.)
- movimientos alternativos: de pequeña amplitud y gran frecuencia, o también de gran amplitud y pequeña frecuencia

Es en los movimientos continuos de gran amplitud en donde tiene su mejor aplicación el motor lineal y su principal manifestación lo constituyen los trenes de muy alta velocidad.

En estos tipos de movimientos es donde aparecen algunas dificultades con el entrehierro ya que las grandes longitudes implican curvas, subidas y bajadas. De emplearse entrehierros muy breves el motor debería efectuar siempre movimientos rectilíneos.

### 3.2.- Motor de campo arrollado o tubular.

Este tipo de motor consta de un inductor tubular y un inducido interior de la misma forma. Una forma de construir el inducido es mediante una barra recubierta con un tubo de cobre. Esta forma es muy simple pero con un gran entrehierro medio. (figura 12)

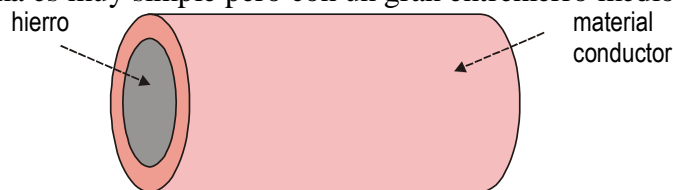


figura 12. - Inducido tubular

Para solucionar el problema de la dimensión del entrehierro lo que se puede hacer es sobre una barra de hierro ir colocando sucesivos anillos de hierro y cobre. (fig 13)

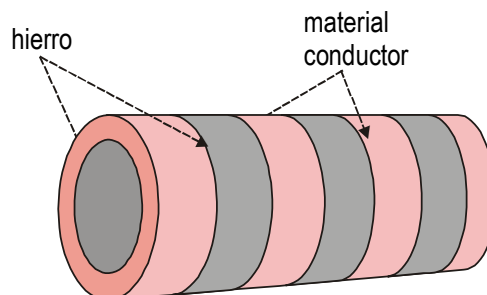
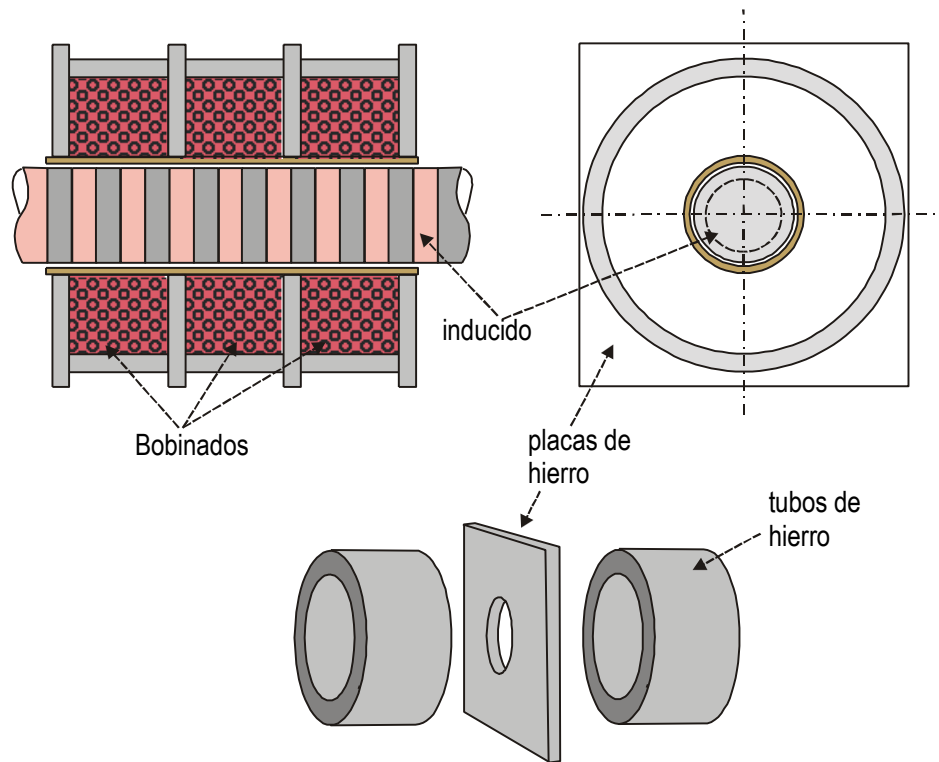


figura 13. - Inducido tubular de anillos

Para construir el primario se cortan placas de hierro y tubos de hierro según figura 14. En realidad hay que trabajar con materiales laminados para disminuir las pérdidas en el hierro. En los espacios intermedios se colocarán los bobinados.



*figura 14. - Inductor de motor tubular*

La construcción de este tipo de máquina es sencilla pero muy difícil de calcular.

El motor lineal tubular se puede aplicar al desplazamiento de metal fundido. Las corrientes inducidas asumirán en tal caso la forma de corrientes de Foucault, pero el resultado final será indiscutiblemente un empuje de naturaleza electromagnética que se ejercerá entre el elemento inductor primario y el elemento conductor secundario.

El motor lineal tubular aplicado al desplazamiento de metal fundido implica una aislación térmica entre éste y el resto de la máquina. El metal fundido actúa como secundario.

Esta máquina tiene muy bajo rendimiento porque si el metal a mover no es hierro, el circuito magnético es de alta reluctancia y es necesario gastar mucha energía para crear el campo magnético, y aún en el caso de que se tratara de hierro, las paredes aislantes crean un entrehierro muy grande con resultados similares.