

## 13.2 - El circuito magnético principal de las máquinas lineales

### 13.2.1 - Líneas de fuerza principales de las máquinas lineales

El flujo inductor que atraviesa el entrehierro y que constituye el flujo activo de la máquina cierra su circuito a través de los polos, los dientes, el yugo del inductor y la lámina inducida.

Nos centraremos principalmente en un tipo de inducido laminar y sin dientes, aunque haya otro tipo de inducido o rotor con dientes más estudiados por otros autores, debido a lo extenso que puede ser este trabajo.

Las figuras 108 a la 117, muestran la forma esquemática del circuito magnético principal para los diferentes tipos constructivos fundamentales de las máquinas eléctricas lineales.

No se pretende una descripción exhaustiva de todas las ventajas e inconvenientes de cada geometría presentada ya que podrían alargar injustificadamente este trabajo. Simplemente se presentarán las geometrías más representativas y alguna de sus características principales.

*Máquinas de inducción lineales planas.*

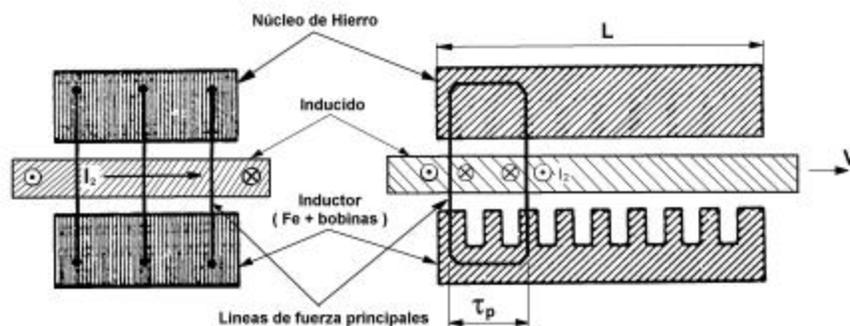


Fig.108 : Inductor plano unilateral (de simple cara) con inducido laminar (sólido) exclusivamente conductor (sin partes ferromagnéticas).

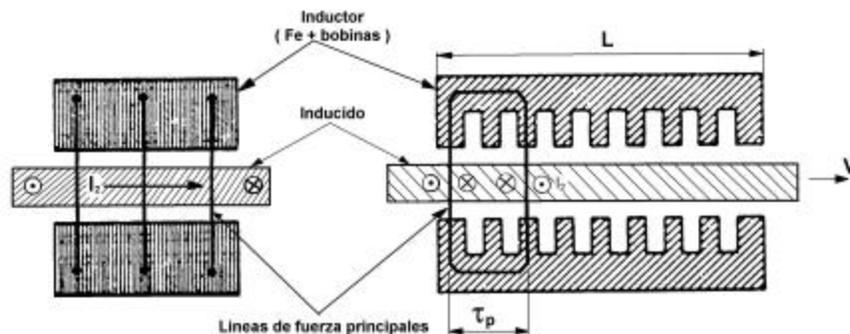


Fig.109 : Inductor plano bilateral (de doble cara) con inducido laminar (sólido) exclusivamente conductor (sin partes ferromagnéticas).

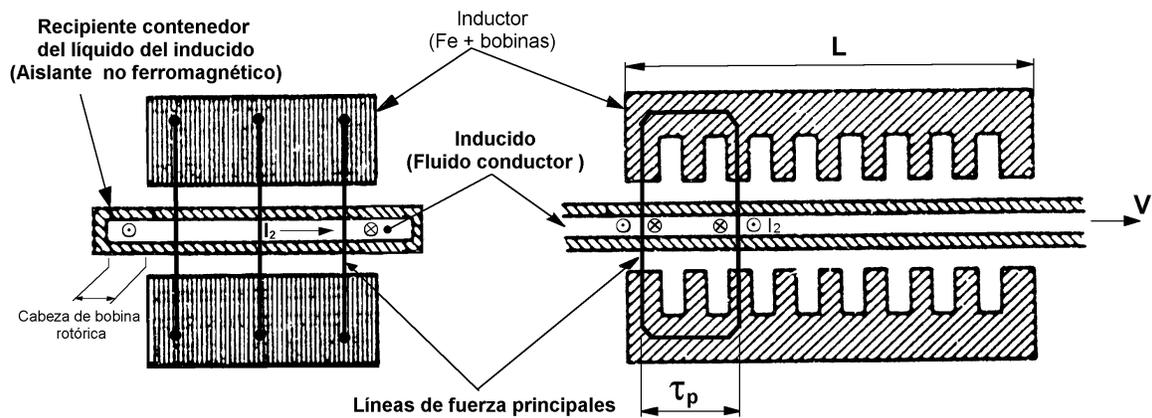


Fig.110 : Inductor plano bilateral con inducido conductor en estado líquido.

*Máquinas de inducción lineales tubulares o anulares.*

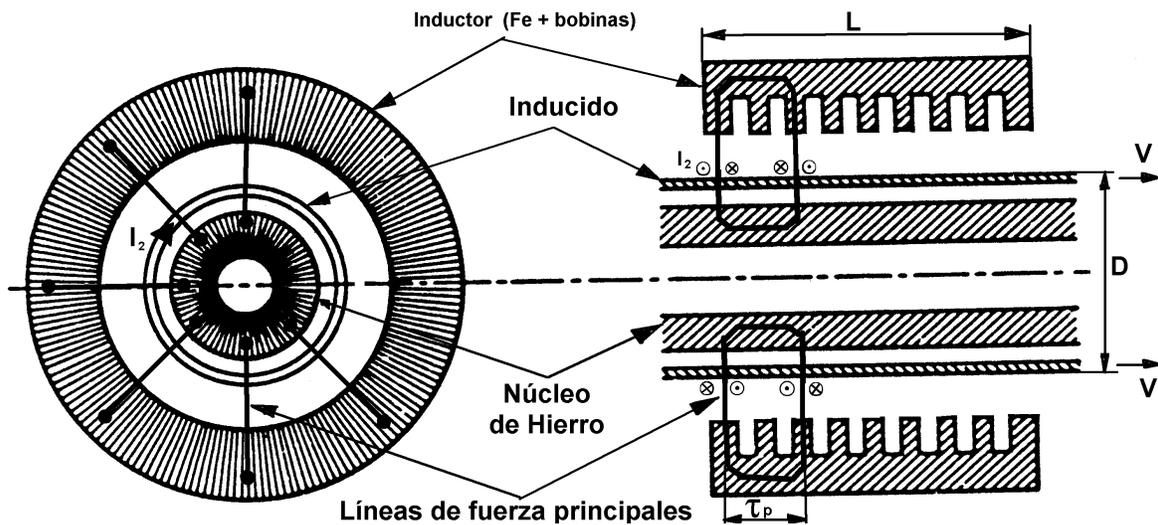


Fig.111 : Inductor tubular de simple cara unilateral con inducido sólido.

En el inducido no son necesarias las cabezas de bobinas, siendo máximo el aprovechamiento del circuito eléctrico.

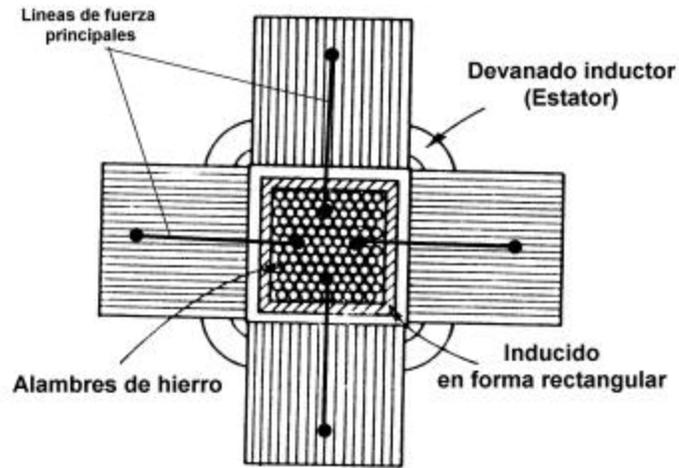


Fig.112 : Inductor tubular prismático unilateral externo.

La geometría de la Fig.112 permite un mejor aprovechamiento de la plancha magnética al componerse de bloques planos separados, y con inducido sólido. En el inducido no son necesarias las cabezas de bobina. El recorrido de las corrientes de inducido es más largo que en el caso de inducido circular de la figura anterior.

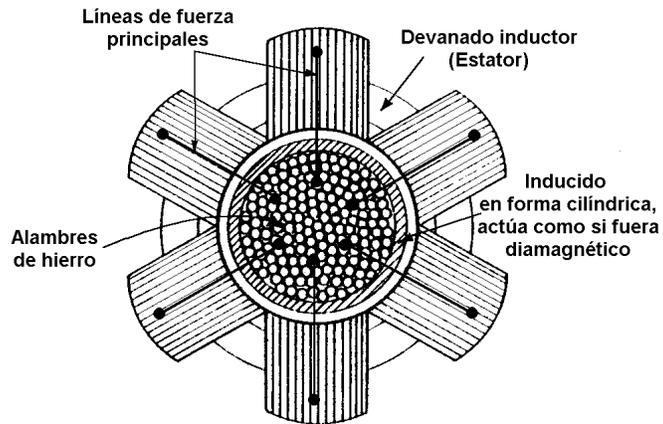


Fig.113 :Inductor unilateral externo con inducido tubular sólido.

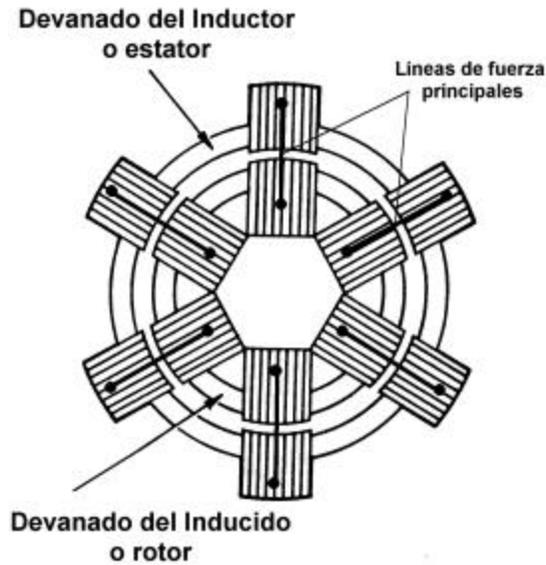


Fig.114 : Inductor prismático unilateral externo construido con bloques planos separados y con inducido sólido, también construido con bloques separados, combinando materiales conductores y ferromagnéticos.

La presencia de hierro en el inducido complica el guiado debido al esfuerzo de atracción por reluctancia entre las partes móviles.

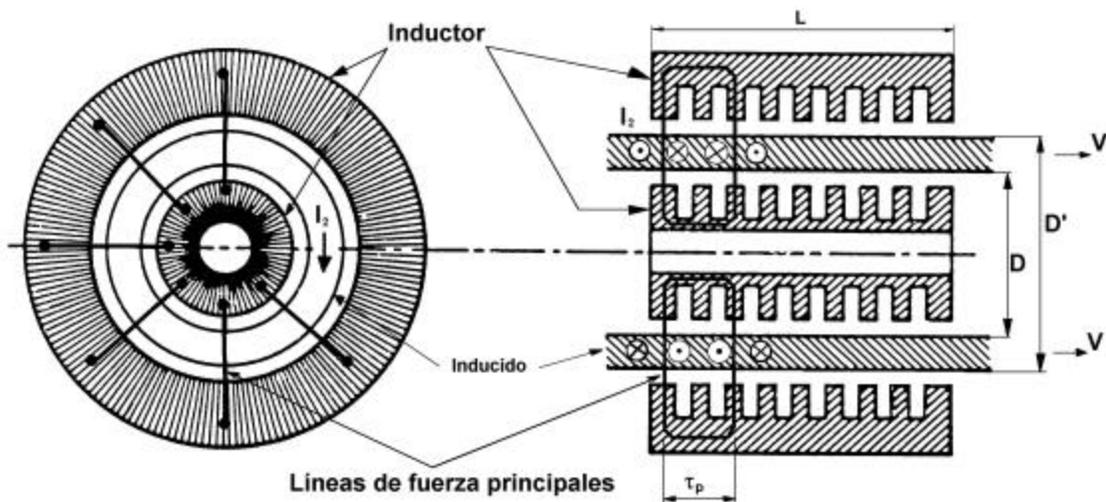


Fig.115: Inductor tubular bilateral (doble cara) con inducido tubular conductor sólido.

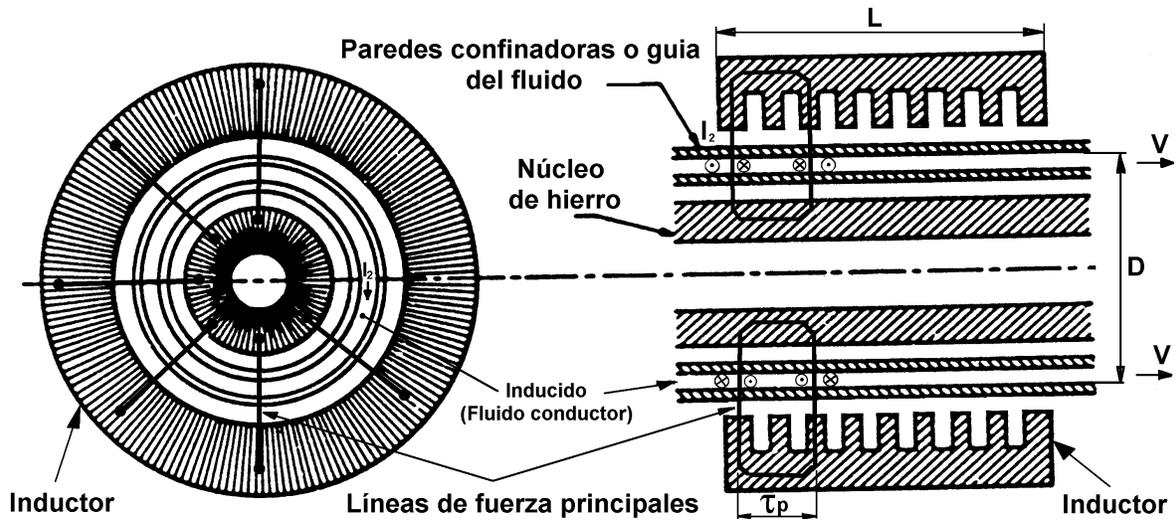


Fig.116 : Inductor tubular unilateral externo (simple cara) con un inducido líquido conductor.

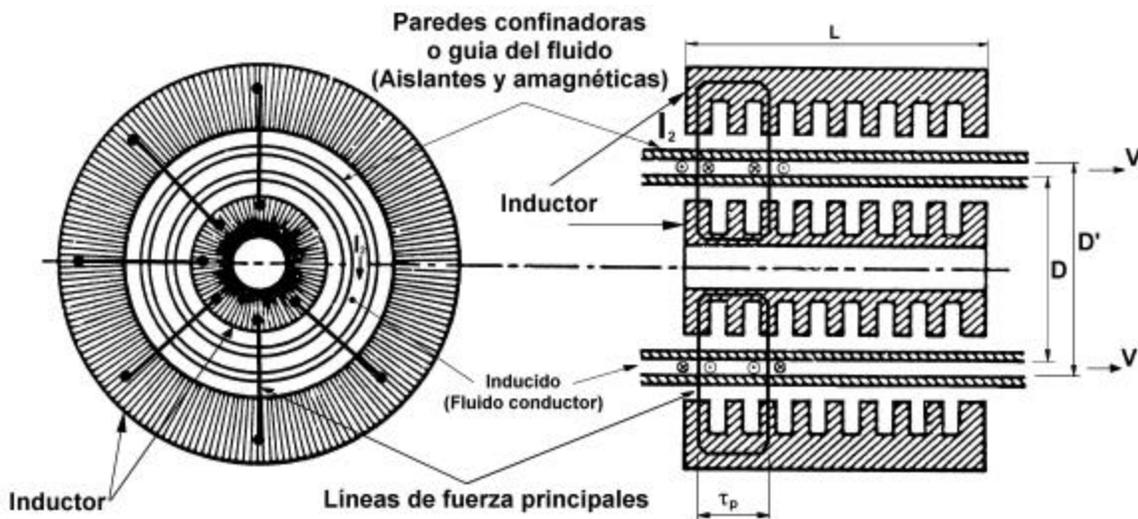


Fig.117 : Inductor tubular bilateral (doble cara) con un inducido líquido conductor.

El problema que se plantea para el estudio del circuito magnético de las máquinas lineales es el de calcular los amperios-vuelta de excitación necesarios a fin de mantener en el entrehierro de la máquina el flujo inductor que se requiere para engendrar una cierta f.e.m. prefijada  $E$ .

El valor de la f.e.m. está ligado al de la tensión en bornes  $U$  según las condiciones de servicio (magnitud y naturaleza de la carga) y las propiedades características de la máquina.

### 13.2.2 - Parámetros del circuito magnético

Para los circuitos magnéticos puede establecerse una ley fundamental similar a la ley de Ohm. Si  $\mathcal{F}$  es la f.m.m. o d.d.p. magnética a lo largo del circuito magnético y  $\Phi$  el flujo que circula por él, cabe escribir la relación:

$$\mathcal{F} = \frac{\Phi}{\mathcal{R}} \quad (13.2.2.a)$$

$\mathcal{R}$  se denomina reluctancia, y su inversa:

$$\mathcal{G} = \frac{1}{\mathcal{R}} \quad (13.2.2.b)$$

$\mu$  se denomina permeancia del circuito magnético, paralelamente a la resistencia y a la conductancia eléctricas.

Si el circuito magnético es de sección uniforme y naturaleza homogénea, la permeancia  $\mu$  del mismo resulta proporcional a la sección transversal  $S$  del conductor magnético e inversamente proporcional a su longitud  $l$  de tal modo que

$$\mu = \frac{S}{l} \quad (13.2.2.c)$$

$$\mu = \frac{1}{\mathcal{R}} = \frac{l}{\mathcal{R} S} \quad (13.2.2.d)$$

El coeficiente de proporcionalidad  $\mu$  o permeabilidad de la sustancia desempeña un papel similar al de la conductividad  $\sigma$  en los circuitos eléctricos.

Haciendo intervenir la intensidad de campo magnético  $H = \frac{\mathcal{F}}{l}$  es decir, la f.m.m. por unidad de longitud (análoga a la caída de tensión, también por unidad de longitud  $U/l$  de un conductor), e introduciendo la densidad de flujo o inducción  $B$  (asimilable a la densidad de corriente  $J$ ) las expresiones anteriores conducen a esta otra:  $B = \mu H$

También podemos escribir:  $\mathcal{F} = \mathcal{R} \Phi = \frac{l}{\mu S} \Phi$  y la f.e.m. por espira:

$$E = \mathcal{R} \frac{d\Phi}{dt} \quad (V) \quad (13.2.2.e)$$

### 13.2.3 - Ley fundamental del circuito magnético

La excitación total requerida para el establecimiento de un campo magnético en el recorrido de una línea de fuerza completa es igual a la integral lineal del campo a lo largo del circuito cerrado de dicha línea

$$\oint H dl$$

En los circuitos magnéticos constituidos, como es el caso de las máquinas, por distintos trayectos homogéneos la integral puede sustituirse por la suma de las f.m.m. parciales.

$$\sum H l \quad (13.2.3.a)$$

La excitación hallada para el recorrido total de una línea de fuerza cerrada corresponde a los A por conductor por par de polos de la máquina. Dada la simetría del recorrido, cabe limitar la suma a una mitad del circuito calculándose entonces  $\sum H l$  en A por conductor por polo.

A los efectos de la suma de la f.m.m. dividiremos el camino de las líneas de fuerza en varios trayectos independientes, dentro de cada uno de los cuales la inducción pueda considerarse como constante, o reducirse, al menos, a un valor medio equivalente, para que el campo también sea constante. Bastará entonces multiplicar éste último  $H$  por la longitud parcial  $l$  deduciéndose así la f.m.m. o excitación correspondiente al recorrido individual considerado.

Los trayectos característicos que cabe distinguir son:

a) para las máquinas eléctricas lineales planas:

- el entrehierro ( $h_g$ )
- los dientes del inductor ( $h_d$ )
- los dientes del inducido si los tiene (normalmente no los tiene)
- el yugo del inductor ( $h_y$ )
- el yugo del inducido si lo hay

b) para las máquinas eléctricas lineales tubulares o anulares:

- el entrehierro ( $h_g$ )
- los dientes del inductor ( $h_d$ )
- los dientes del inducido si los tiene (normalmente no los tiene)
- la corona del inductor ( $h_c$ )
- la corona del inducido

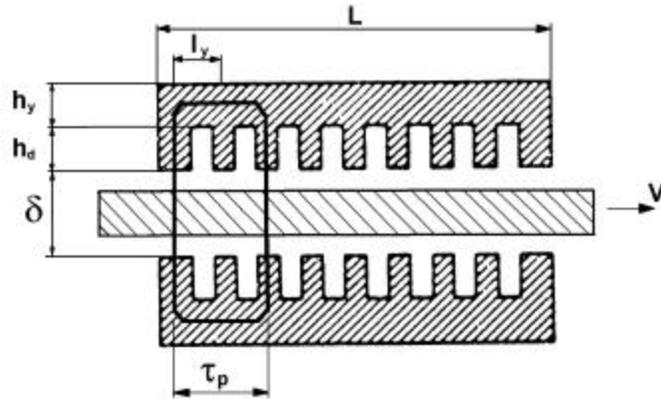


Fig. 118: Trayectos característicos de las líneas de fuerza de las máquinas eléctricas lineales planas.

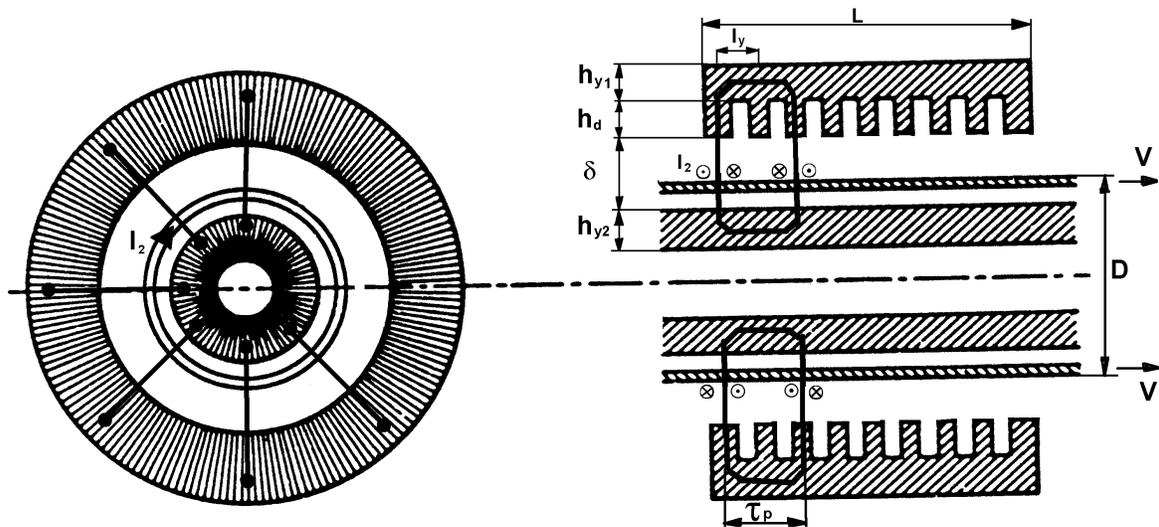


Fig. 119: Trayectos característicos de las líneas de fuerza de las máquinas eléctricas lineales tubulares o anulares.

La longitud del yugo de las máquinas lineales vale:

$$l_y \approx \frac{L}{4p} \text{ (m/polo)} \quad (13.2.3.b)$$

El proceso a seguir al calcular el campo en cada tramo parcial consiste en empezar por hallar el flujo  $\Phi$  que ha de circular por él según la f.e.m. a inducir. Del flujo y de las dimensiones de la sección transversal S se deriva la inducción máxima  $\bar{B}$ , sobre la cual habrá que establecer en general ciertas correcciones para tener en cuenta la falta de homogeneidad en la distribución del flujo.

Obtenido, tras estas correcciones, el valor máximo de la inducción real, se consigue la intensidad de campo  $\hat{H}$  por medio de la curva de inducción, si se trata de un elemento ferromagnético, o según la ecuación

$$\hat{H} = \frac{\hat{B}}{\mu_0} \mu_{Am}^{-1}$$

si se trata de un recorrido en el aire (entrehierros).

La excitación es menor si el rotor tiene partes ferromagnéticas ya que su reluctancia es menor, pero ello complica notablemente el guiado del inducido al aparecer una fuerza de atracción entre inductor e inducido de valor muy importante. Nótese que el esfuerzo primario es de atracción del hierro rotórico desde el estator o entre ambos semiestatores en el caso de inductor bilateral. Si este esfuerzo primario de disminución de reluctancia consigue compensarse mediante anclajes y elementos de guiado, aparece la fuerza de tracción perpendicular al entrehierro que caracteriza los motores lineales.