

## 2. INTRODUCCION.

Históricamente las máquinas de flujo axial fueron las primeras en desarrollarse, ya en 1821 Faraday desarrolló el primitivo disco motor [91], que ya tenía la forma de una máquina de flujo axial.

Era razonable que así fuese, puesto que eran más fáciles de realizar que otras topologías de máquina. Presentaban, sin embargo el inconveniente de precisar de una elevada corriente de magnetización debido a su gran entrehierro, mientras que en las máquinas radiales el problema prácticamente se reducía al flujo en un entrehierro pequeño. Si se añade a esto el establecimiento de los 50-60 Hz como frecuencia industrial, las máquinas de flujo axial quedaron reducidas a máquinas de potencia fraccional e instrumentación.

Esta situación ha perdurado durante más de 150 años, hasta que factores técnicos como el desarrollo de nuevos materiales, la electrónica de potencia y la capacidad de control; y sociales, como la creciente importancia del cuidado de nuestro entorno natural, ha hecho que durante los últimos 14 años se haya desarrollado un interés creciente por este tipo de motores. Que se ha visto reflejado en la literatura técnica relacionada.

Desde un punto de vista técnico, el desarrollo de nuevos materiales magnéticos, como imanes de elevada inducción remanente (Nd-Fe-B, Br=1,2 T, Hc=1 kA/mm), nuevos materiales metálicos de bajas pérdidas y el desarrollo de los materiales superconductores ha permitido que las restricciones que impedían mejorar el gran entrehierro de las máquinas axiales sean, a día de hoy, resoluble.

Desde el punto de vista medioambiental, la búsqueda de energías y accionamientos que reduzcan el consumo energético y que minimicen su impacto sobre el entorno ha vuelto a la actualidad este tipo de motores, que se caracterizan por su compacidad y elevado ratio par/volumen del motor.

La aplicación que más estudio ha desarrollado es la aplicación en automóviles, puesto que la propia forma del motor hace que el concepto de "rueda motriz" sea posible, otras aplicaciones en desarrollo afectan a todas aquellas, que como en los automóviles, el peso del conjunto es crítico. Esto es lo mismo que decir todas aquellas aplicaciones de transporte de personas o mercancías (aéreo, marítimo, terrestre).

En los años 50 del pasado siglo XX el profesor E.R. Laitwaite enunció la fórmula del factor de calidad de las máquinas eléctricas,

$$G = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{L}{R} \quad (2.1)$$

G: Factor de calidad

L:	Inductancia del circuito magnético de referencia
R:	Resistencia del circuito eléctrico de referencia
f:	Frecuencia de trabajo

Donde se ven reflejadas las variables fundamentales que permiten orientar el desarrollo de las máquinas eléctricas hacia geometrías diferentes a la radial. Un aumento de la frecuencia en las máquinas radiales actuales hace que las pérdidas en el hierro se disparen de forma cuadrática, complicando extraordinariamente la electrónica de control, ya que los armónicos que aparecen no son triviales de controlar. La primera conclusión que se podría extraer es que en una máquina donde se buscase mejorar su factor de calidad vía un aumento de la frecuencia, requeriría de forma necesaria la eliminación del hierro. Esta es la conclusión a la que han llegado investigadores [113] [121] de motores superconductores, que justifican la ausencia del hierro cuando se busca aumentar la inducción  $\bar{B}$ , debido a que traspasado el límite de saturación, la diferencia entre emplear hierro o no se reduce porcentualmente a medida que se aumenta la inducción.

Se ha de decir, que el aumento de la inducción sólo es factible mediante el empleo de materiales superconductores que soporten densidades de corriente muy elevadas, del orden de  $10^5$  A/cm<sup>2</sup>. Así mismo la geometría que se ha comprobado que proporciona los mejores resultados en este tipo de motores es la de flujo axial, ya que es la que favorece que el campo sea perpendicular a la zona de acoplamiento o entrehierro [113].

La disminución de la resistencia en (2.1) es otro punto que incide directamente sobre los motores superconductores, ya que permiten reducir la R teóricamente a cero (lo que al mismo tiempo las convierte en máquinas síncronas).

Por lo visto expuesto hasta ahora, la geometría de flujo axial es una geometría de futuro en el desarrollo de las máquinas eléctricas, impulsadas sobre todo por el desarrollo de superconductores.

Una ventaja adicional que proporciona la geometría axial es la facilidad constructiva si se eliminan los dientes de los devanados inductores, ya que se reduciría la autoinductancia de los devanados de forma drástica, haciendo máquinas menos inductivas cuya facilidad constructiva aumentaría de forma notable.

Por contra sería necesario aumentar la f de trabajo para mejorar el acoplamiento entre los circuitos rotóricos y estáticos. Es decir buscando mantener el factor de calidad.

Pero la ventaja que desde el punto de vista industrial resulta más atractiva es la posibilidad de que los motores pasen a formar parte de la estructura con la que van a actuar o a traccionar. En los motores radiales convencionales es prácticamente imposible debido a los elevados esfuerzos de reluctancia que aparecen. Que obliga a la presencia de cojinetes muy solicitados.

La posibilidad de la existencia de motores sin cojinetes [112] basados en topologías de flujo axial haciendo uso del efecto levitación permitiría la inclusión de estas topologías en estructuras en que el motor formase parte de la estructura de la aplicación.

Una aplicación que ya existe consiste en las ruedas automotrices empleadas en vehículos solares [19] [23] [74] [79] [81] [87] [118] que incorporan el motor en la estructura de la rueda motriz. Otra es el empleo de geometrías de flujo axial en servomotores comerciales en los que el rotor está formado por imanes permanentes [120] .

Si se desea emplear geometrías de flujo axial los problemas y las dudas surgen de manera inmediata, ya que los motores a base de rótores sólidos de aluminio y semiestatores bobinados sobre bases ferromagnéticas sin dientes, como los desarrollados en el Departament d'Enginyeria Eléctrica (DEE) de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyers Industrials de Barcelona - UPC, han dado a la par que resultados prometedores, problemas, como son el rendimiento o fenómenos de difícil explicación, como son la aparición de velocidades de rotación muy alejadas de la de sincronismo.

Volviendo de nuevo a las aportaciones del profesor Laithwaite, las mejoras en el comportamiento mecánico de las máquinas lineales se puede obtener:

- Aumentando la densidad de corriente.
- Aumentando la permeabilidad o la inducción máxima.
- Aumentando la frecuencia de trabajo manteniendo la velocidad de sincronismo.

Estas geometrías y configuraciones de máquina propuestas por Laithwaite son especialmente afortunadas y simples de construir. Muchos investigadores han intentado reproducirlas sin éxito, como demuestra la poca presencia de resultados en la literatura técnica, más allá del equipo del propio E.R. Laithwaite.

Una aportación de esta tesis consiste en la explicación de esta falta de resultados por parte de otros equipos de trabajo, que a nuestro entender reside en la dificultad del análisis en 3D de las máquinas eléctricas.

Una vez realizado este análisis 3D, se evidencian unas circulaciones de corriente en bucle en forma de 8 absolutamente impredecibles de forma intuitiva, ya que su aparición en cada polo de la máquina supone un desafío a la imaginación. Estas circulaciones de corriente anómalas, son inesperadas desde un punto de vista de diseño clásico y totalmente contrarias a la intuición propia del constructor de máquinas eléctricas.

Estos fenómenos electrodinámicos son de carácter aparentemente aleatorio, pues sólo aparecen a determinadas frecuencias y deslizamientos. Cualquier equipo de investigadores que haya ensayado máquinas similares sin tener en cuenta el análisis del presente trabajo, que parte del mejor campo magnético posible en el entrehierro, habrá tenido resultados experimentales decepcionantes, con lo que sus resultados no habrán sido publicables.

Sólo los actuales equipos informáticos y el software específico de MEF empleado en el cálculo, permiten determinar situaciones electromagnéticas que se detallan a lo largo del presente trabajo.

En todas las máquinas eléctricas de flujo axial construidas hasta ahora en el equipo del Dr. Ricard Bosch (DEE – UPC), la frecuencia de trabajo ha sido la frecuencia industrial de 50 Hz, empleando siempre materiales ferro-magnéticos como el hierro como soporte de los inductores y materiales tanto ferro-magnéticos, como no magnéticos, fundamentalmente el aluminio.

El camino marcado en la línea de investigación del equipo nos lleva a superar las frecuencias industriales y al empleo de materiales no convencionales como materiales diamagnéticos, que podrían ser resinas plásticas, maderas, etc.

Las nuevas incógnitas que se abren en esta línea de trabajo llevan necesariamente a intentar “visualizar” lo que sucede en el interior de las máquinas axiales realizadas hasta la fecha. Para ello la mejor vía que se planteó fue la simulación mediante el Método de los Elementos Finitos (MEF ó FEM en inglés).

La geometría a analizar es difícilmente simplificable a dos dimensiones (2D), puesto que el flujo se establece en la dirección perpendicular al plano de simulación en 2D, así como el planteamiento del problema como dinámico, puesto que la máquina está en movimiento. Planteado así, se aborda el problema empleando el único software comercial que permite simulaciones magnetodinámicas en 3D, que es ANSYS, en su versión 5.6.

La ventaja que plantea este software es lo abierto de su configuración, ya que permite formas 3D definidas a voluntad, aunque esta libertad de formas implica que es necesario definir completamente los modelos, no teniendo predefinidas ningún tipo de funciones que permitan simplificar el cálculo. Es por ello un trabajo laborioso, que requiere una adecuada definición del modelo, su construcción en un sistema CAD adecuado (Pro/Engineer ó CATIA) que permita su exportación; el mallado “manual” del modelo CAD, con el fin de conseguir una buena homogeneidad que reduzca los posibles errores; y finalmente la correcta definición de las condiciones de contorno.

Las geometrías que se han desarrollado en el DEE-UPC, presentan la ventaja de que las partes móviles (rótora) no presentan discontinuidades en su sección transversal, puesto que son un disco sólido de aluminio. Este detalle ha sido de vital importancia, puesto que permite la simulación dinámica, ya que ésta sólo es abordable en geometrías que no presentan discontinuidades.

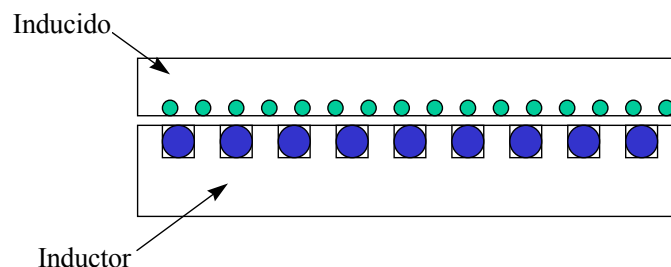
Esta tesis presenta los resultados obtenidos, así como las aportaciones que se están implementando en los prototipos de máquina axial que están en construcción actualmente en el DEE-UPC.

## 2.1. Evolución topológica de la máquina de inducción radial a la axial.

Las máquinas de inducción, desde su aparición a finales del s. XIX, han evolucionado adoptando formas diferentes en función de las necesidades de diseño. Una clasificación de esta evolución topológica extraída de la que se presenta en [112] es la siguiente:

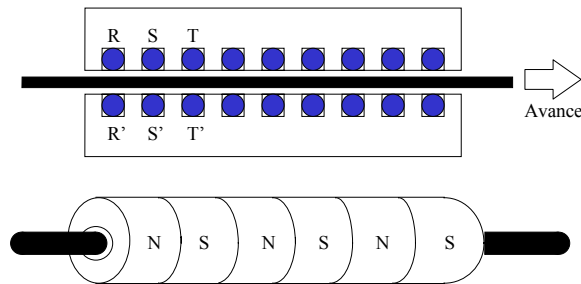
- Máquinas de rotor bobinado:
  - Sincronizables.
  - Convertidores de frecuencia.
  - Selsyn.
- Máquinas con rotor en jaula de ardilla.
  - De rotor macizo.
  - Rotor laminar
    - \* Motor lineal unilateral.
    - \* Rotor de copa o Drag Cup.
    - \* Motor lineal tubular.
      - ⇒ Rotor líquido.
    - \* Motor lineal bilateral.
      - ⇒ Estator alargado respecto al inducido.
      - ⇒ Estator acortado respecto al inducido.
      - ⇒ Rotor de disco.
    - \* Motor rotativo de flujo axial.

La máquina lineal unilateral es una evolución topológica de la máquina radial convencional, que se obtiene desplegando la máquina radial,



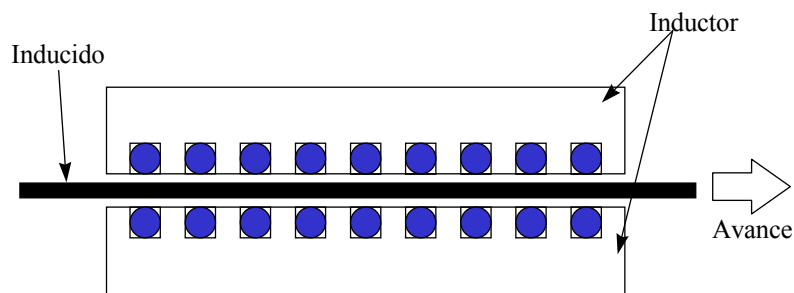
**Figura 1. Máquina lineal unilateral.**

La siguiente evolución de la anterior es, por una parte, la máquina lineal tubular, que se obtiene plegando de nuevo la máquina, pero esta vez tomando como eje el eje longitudinal del inducido.



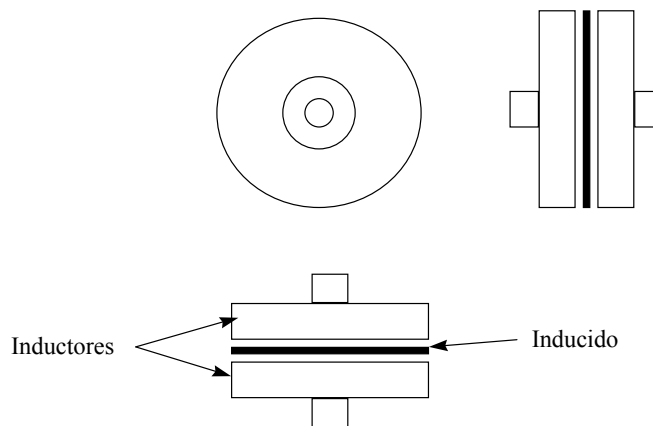
**Figura 2. Máquina lineal tubular.**

De la lineal unilateral se desprende la bilateral, que es una máquina lineal con dos inductores, que aparece por necesidad de equilibrar los esfuerzos de reluctancia de las unilaterales y por la necesidad de aumenta la Fuerza Magnetomotriz, debido a los elevados entrehierros de estas máquinas.



**Figura 3. Máquina lineal bilateral.**

Por último la evolución hacia las máquinas rotativas de flujo axial se obtiene plegando la máquina lineal bilateral hasta que adopta de nuevo la geometría radial, pero esta vez el devanado inductor no queda alineado con el eje de rotación de la máquina, sino que queda dispuesto en dirección radial.

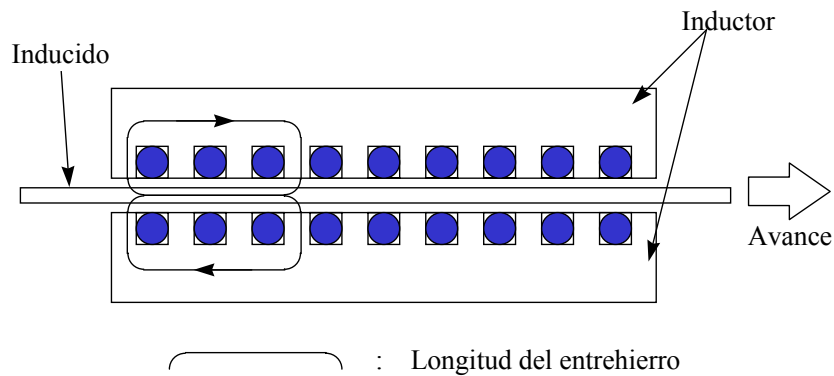


**Figura 4. Máquina rotativa de flujo axial de doble estator.**

## 2.2. Máquinas lineales y máquinas de flujo axial.

### 2.2.1. Primeras diferencias máquina rotativa - máquina lineal y axial.

Las máquinas lineales, por ser la primera evolución topológica de las máquinas rotativas, presentan fenómenos diferentes a estas últimas, algunos de los cuales son comunes a las máquinas de flujo axial. En las máquinas lineales, si el inducido es ferromagnético, provoca la aparición de esfuerzos de reluctancia en sentido transversal al avance del inducido. Siendo ferromagnético, se precisa de menos fuerza magnetomotriz, que si no lo es. En este último caso, el entrehierro crece de manera significativa, siendo necesario el uso de otro inductor para aumentar la fuerza magnetomotriz, apareciendo la máquina bilateral.



**Figura 5. Longitud de entrehierro en máquinas lineales**

El entrehierro en las máquinas lineales o axiales, depende del número de pares de polos, puesto que cuanto menor es éste menor es la longitud del entrehierro. El entrehierro, con inducido no ferromagnético, está constituido no solo por la separación  $2\delta$  entre inductor e inducido. Si no también por la longitud polar del inducido, por donde se cierran las líneas de flujo.

El aumento del número de polos implica una reducción de la velocidad de sincronismo, que se puede compensar con un aumento proporcional de la frecuencia.

Otro factor importante que constituye un límite para el número máximo de polos presentes es de tipo mecánico, sobre todo en las axiales. Este límite es puramente físico, ya que para mantener una excitación determinada, llega un momento en que el conductor o conductores del devanado inductor no caben porque no hay espacio suficiente.



Al igual que en las máquinas de inducción radiales, en las máquinas lineales en el inducido aparece el mismo número de fases que en el inductor, con las ondas de fuerza magnetomotriz de inductor e inducido desplazándose a la misma velocidad lineal. Es el desfase entre ambas el que proporciona el par motor [116] ,

$$T = -\pi \cdot p \cdot \frac{\mu_0 \cdot l \cdot R}{\delta} \cdot F_{M1} \cdot F_{M2} \cdot \text{sen}\theta \quad (2.2)$$

p:	Pares de polos de la máquina
l:	Longitud efectiva de los devanados inductores (mm)
R:	Resistencia del devanado inductor ( $\Omega$ )
$\delta$ :	Distancia entre inductor e inducido (mm).
$F_M$ :	Fuerza magnetomotriz (Av)
$\theta$ :	Desfase entre f.m.m. de inductor e inducido.

El inconveniente que presentan las máquinas lineales, y las axiales, es la elevada corriente magnetizante debido a los elevados entrehierros. En las máquinas lineales, el entrehierro es del orden de 10 veces superior a las máquinas rotativas y el deslizamiento del orden de 5 veces superior [114] .

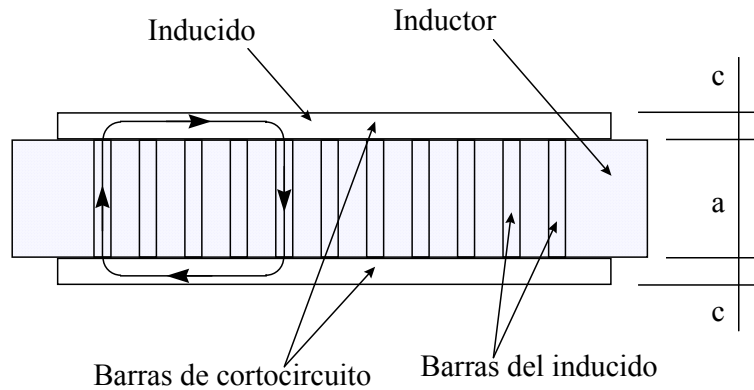
## 2.2.2. Efectos especiales en máquinas lineales y axiales.

### 2.2.2.1. Efecto de longitud finita.

Este efecto se produce únicamente en las máquinas lineales y supone una variación brusca de permeabilidad en los extremos abiertos de la máquina. Esto implica la existencia de un campo de fugas y la aparición de componentes parásitos pulsatorios que se propagan por el interior de la máquina. Según el profesor Laitwaite [122] el número mínimo de polos en un motor lineal donde el inductor es más corto que el inducido debe ser de 6. Esto en función de la velocidad de desplazamiento (V) y la frecuencia de las corrientes de excitación (f).

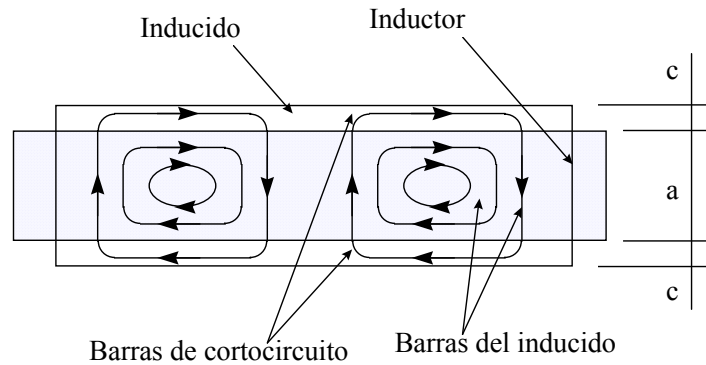
### 2.2.2.2. Efecto de anchura finita.

Cuando se dispone de un inducido formado por barras cortocircuitadas, como las de la figura siguiente, la corriente circula por caminos muy definidos, siendo efectiva y proporcionando par en el tramo en el que recorre la barra (a).



**Figura 6. Inducido formado por barras en una máquina lineal.**

Cuando el inducido es sólido la corriente se cierra parte por las conexiones frontales, o cabezas de bobina (c), y parte por el interior de la zona activa (a).



**Figura 7. Efecto de longitud finita en máquinas lineales y axiales.**

Esto reduce la componente útil de la corriente inducida, lo que se transforma en una reducción de la potencia útil de la máquina. La importancia de este efecto depende de la anchura relativa de las partes donde cambian y se anulan las fuerzas electromotrices, así como de la resistividad de las bandas laterales de cierre. Se considera que la cabeza de bobina (c) debe ser como mínimo la del paso polar para permitir la circulación de la corriente inducida de forma uniforme.

Como se puede observar lo que sucede en el interior del inducido es realmente difícil de predecir, puesto que no existen caminos claros para la circulación de corriente en la zona útil. Es objeto de la presente tesis determinar los efectos que se producen en el interior del inducido de las máquinas axiales con el fin de optimizar los rotores. Esto se hará determinando los caminos de corriente óptimos en el interior del inducido mediante herramientas de cálculo por elementos finitos.

Las cabezas de bobina tienen una forma óptima, que es del tipo T, de tal forma que se minimiza la reactancia a igualdad de resistencia de la cabeza de bobina, puesto que la corriente describe una espira más cerrada.

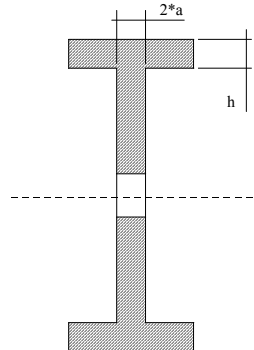


Figura 8. Cabeza de bobina en el rotor de una máquina de flujo axial.

El valor de h se recomienda que sea,  $h = \frac{1}{2} \tau_p 2a$ .

### 2.2.2.3. Efecto de penetración.

Cuando el campo inductor pasa por dentro del inducido en movimiento, el campo experimenta una deformación que se traduce en un aplanamiento de las líneas de fuerza. Este aplanamiento supone una reducción de la componente normal del campo  $\vec{B}$  que es tanto mayor cuanto mayor es el deslizamiento.

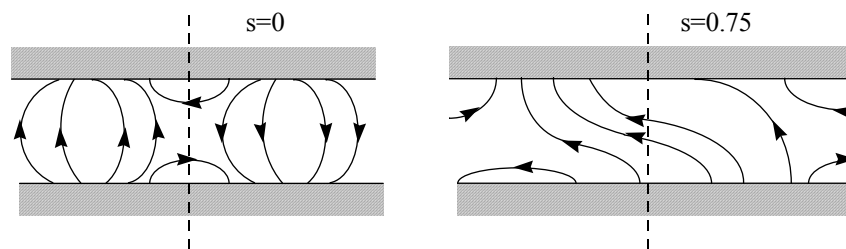
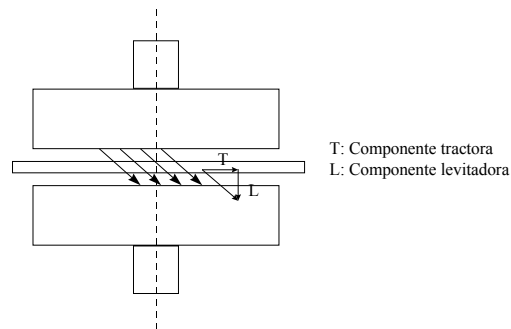


Figura 9. Aplanamiento de las líneas de campo en máquinas lineales.

### 2.2.2.4. Efecto Levitación.

El efecto Levitación, planteado por primera vez por el profesor Ricard Bosch en su tesis doctoral [112] consiste en forzar el efecto descrito anteriormente encarando polos Norte y Sur desfasados en los semiestatores de una máquina axial. Con ello se consigue que aparezca una componente de fuerza

axial que se emplea a efectos de levitación del rotor, descargando por tanto a los cojinetes del esfuerzo de centraje del mismo.

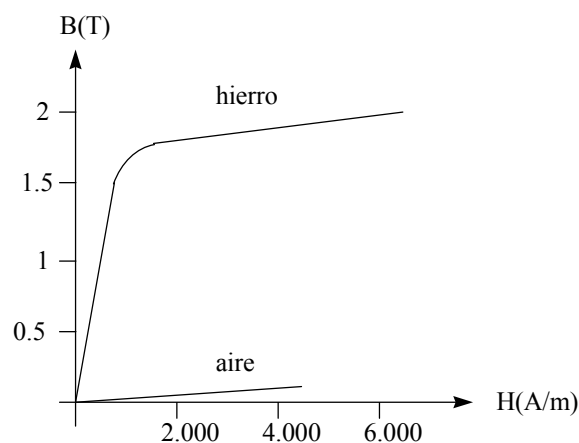


**Figura 10. Aparición de componente levitadora por desfase entre polos de ambos semiestatores.**

### 2.3. Elevación de las $f$ de trabajo y cambio de materiales constructivos.

Una de las aplicaciones donde encuentran utilidad, por su facilidad constructiva, las máquinas de flujo axial es en las máquinas superconductoras, donde el hierro deja de tener importancia frente a las densidades de corriente que se manejan, del orden de hasta centenares de miles de A por  $\text{cm}^2$ . La razón para que el hierro deje de ser necesario es el cambio de orden de magnitud que experimentan las densidades de corriente.

Para inducciones normales del orden de 1.000 A/m es necesario emplear materiales ferromagnéticos si se quieren alcanzar densidades de flujo del orden de 1T. Estos valores se obtienen para densidades de corriente que están al límite de lo que suelen dar los conductores de cobre normales y sus aislamientos.

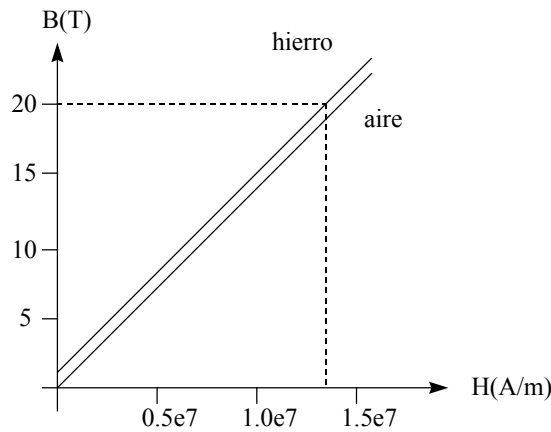


**Figura 11. Comparación entre inducción al aire o en medio ferromagnético**

Si las densidades de corriente dejan de ser un problema por el empleo de materiales superconductores, entonces existe muy poca diferencia entre las inducciones que se pueden conseguir sobre hierro o directamente al aire. Empleando hierro puro, para conseguir un campo de 20T se precisa una densidad de corriente de  $1.43 \cdot 10^7$  A/m. Pero para una densidad de corriente así, el campo que se obtiene en el aire es,

$$B = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,43 \cdot 10^7 = 18T$$

Que como se ve es del mismo orden de magnitud que el obtenido sobre hierro. Con la ventaja adicional de que las pérdidas en el hierro con una densidad de flujo de 20 T son muy elevadas, mientras que sobre aire son despreciables.



**Figura 12. Comparación entre campos en hierro y aire para densidades de corriente muy elevadas.**

Una alternativa al empleo de superconductores es el incremento en la frecuencia de trabajo de las máquinas. Hasta hace unas décadas, hablar de variaciones de frecuencia que fueran comercializables era ciencia ficción, hoy en día la electrónica de potencia ha evolucionado tanto que es una realidad. Por tanto se puede convertir en realidad las afirmaciones del profesor Laitwaite en cuanto a las mejoras en el comportamiento de las máquinas lineales y, a su lado, las axiales.

Pero la variación de frecuencia comporta la variación en el número de polos de la máquina para mantener velocidades de sincronismo, y la variación en el número de polos puede condicionar las densidades de corriente que se pueden alcanzar.

Un aumento en la frecuencia obligaría a emplear materiales no ferromagnéticos, ya que las pérdidas por histéresis ( $P_H$ ) crecen de forma lineal con la frecuencia y las pérdidas de Foucault ( $P_F$ ) con el cuadrado de la misma.

$$P_H = k \cdot f \cdot B^2 (W / kg) \quad (2.3)$$

$$P_F = \Gamma \cdot (e \cdot f \cdot B)^2 (W / kg) \quad (2.4)$$

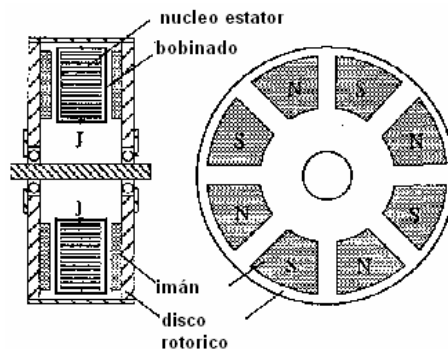
k:	Constante de calidad de la chapa.
f:	Frecuencia (Hz).
B:	Inducción máxima (T).
e:	Espesor en mm.
$\Gamma$ :	Factor que depende de la calidad de la chapa.

## 2.4. Clasificación de las máquinas de flujo axial.

La primera clasificación que se puede hacer de las máquinas axiales, vendría dada por la forma de generar la corriente magnetizante:

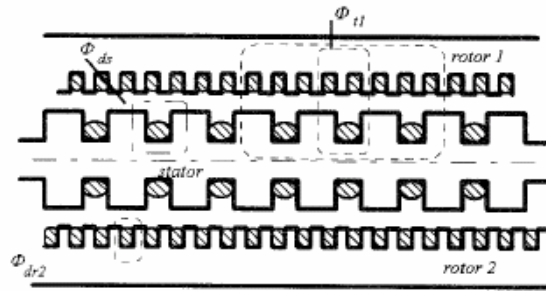
- Máquinas de imanes permanentes (AFPM) o síncronas.
- Máquinas de inducción (AFIM).

En las primeras (AFPM) el campo se establece mediante imanes permanentes situados en el rotor, por lo que la máquina sólo da par cuando existe sincronismo entre la velocidad del campo estático y la velocidad de giro del rotor.



**Figura 13. Máquina axial con 2 rotores exteriores de imanes permanentes (AFPM).**

En las segundas, (AFIM) el par se obtiene porque existe deslizamiento entre las velocidad del campo estático y la velocidad del rotor. La corriente de magnetización es una componente de las generadas por el estator.

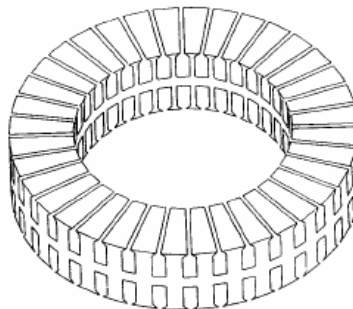


**Figura 14. Desarrollo en radio medio de máquina axial de inducción (AFIM).**

Otra clasificación podría ser en función de la disposición de los conductores en el estator, ya que este podría ser ranurado o no.

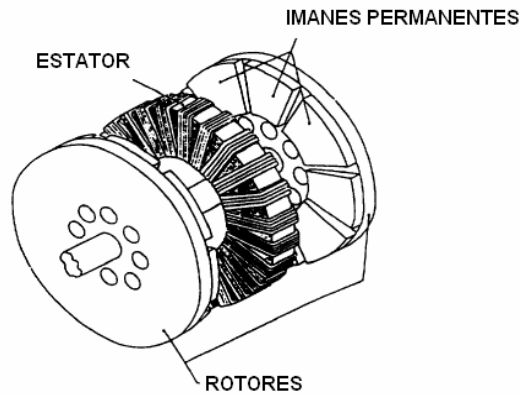
- Máquinas de rotor ranurado. (AFSM)
- Maquinas sin ranuras (AFSLM).

En las primeras los conductores del rotor se alojan en ranuras practicadas en el estator, lo que tiene la ventaja de la robustez mecánica, pero ocasiona una variación en la reluctancia del circuito magnético que ve el rotor al girar, ocasionando pulsaciones o armónicos de par que pueden ser muy importantes (*par de ranura*). Otra causa de pulsaciones es el *rizado del par* que depende de la forma de la onda de fuerza magnetomotriz (MMF), que depende, a su vez, del circuito magnético de la máquina y la forma de las corrientes del estator [49].



**Figura 15. Estator ranurado de una máquina axial.**

En las máquinas sin ranuras el bobinado del estator va directamente bobinado sobre éste, que tiene forma toroidal. Con el fin de aumentar sus propiedades mecánicas va recubierto o embebido en resina epoxi. Con ello se elimina el *par de ranura*, pero presenta la desventaja de tener una inductancia de fase muy baja, lo que hace que el control de campo sea prácticamente inexistente.



**Figura 16. Máquina AFIM con estator sin ranuras y bobinado toroidal.**

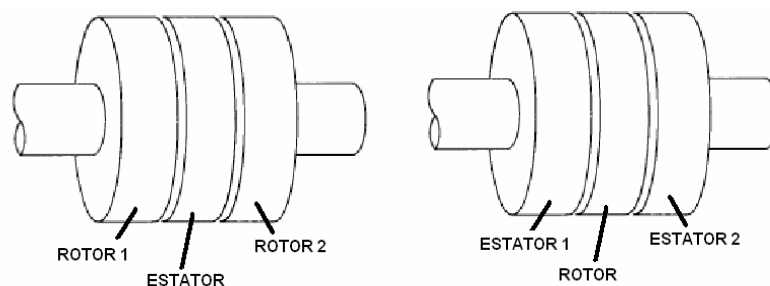
Si la máquina axial tiene un único estator y rotor, existen fuerzas de atracción muy fuertes entre ambos, que tendrán que soportar los cojinetes. Por este motivo las configuraciones que se adoptan para equilibrar este efecto son de doble rotor o doble estator. De aquí surge una nueva clasificación.

- Máquinas de rotor interior (AFIRM).
- Máquinas de rotor exterior (AFERM).

En las primeras, el rotor se encuentra entre 2 estatores; en las segundas existe un único estator entre dos rotors que se encuentran a ambos lados.

Las AFERM presentan una ventaja evidente sobre las de doble estator, y es que se aprovecha mucho mejor el estator y las pérdidas por efecto joule son mucho menores.

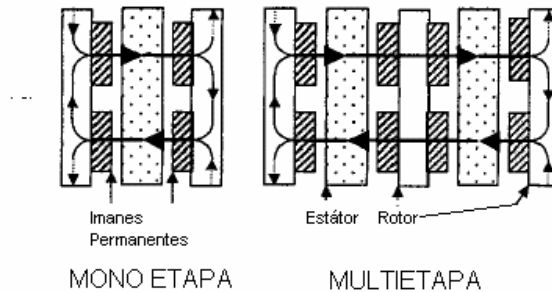
Si tenemos en cuenta que el par en este tipo de máquinas lo proporcionan la porción de los conductores que se encuentran en la dirección radial, se comprenderá que en las AFERM se empleen ambas caras del estator para producir par, mientras que en las AFIRM sólo se emplea una cara de cada uno de los estatores. Además las pérdidas por efecto joule en el estator de las AFERM son del orden del 60% inferiores a las AFIRM.



**Figura 17. Máquinas AFERM (izq.) y AFIRM (der.).**



De lo descrito en el párrafo anterior se obtiene otra posible clasificación que consiste en si la máquina es de un solo bloque o multibloque.



**Figura 18. Máquinas mono y multi-etapa.**

Cuando los requerimientos de espacio radial son críticos la forma habitual de incrementar pares y potencias de este tipo de máquinas es incrementar el número de bloques de la máquina.

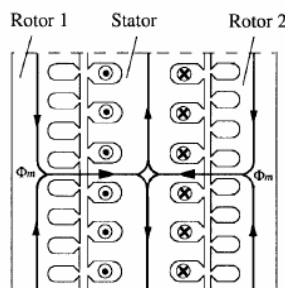
- Máquinas mono-etapa (AFSSM).
- Máquinas multi-etapa (AFMSM).

La etapa base está compuesta por un único estator que se encuentra entre dos rótores. Las etapas siguientes se consiguen añadiendo un rotor y un estator.

Por último otra forma de clasificar las máquinas axiales depende de si en el estator los polos son opuestos en cada cara enfrentada al rotor (N-S), o son de la misma polaridad (N-N ó S-S).

- Máquinas N-N (AFM-NN).
- Máquinas N-S (AFM-NS).

Suponiendo una configuración de doble rotor y un estator (AFERM), en las primeras los rótores, para una sección transversal dada, tendrán polaridades iguales. Suponiendo que las líneas de flujo se inician en un rotor (R1), atraviesan el entrehierro hasta el estator, se cierran por la armadura del estator y vuelven hacia R1. Con el otro rotor (R2), sucedería lo mismo.



**Figura 19. Máquina NN de rotores exteriores.**

En el segundo tipo de máquinas los rótores R1 y R2 tiene polaridades opuestas para una sección transversal dada. Iniciándose la línea de flujo en R1, atraviesa el entrehierro, atraviesa el estator de lado a lado, atraviesa el segundo entrehierro y se cierra por el rotor R2, volviendo de nuevo al estator, atravesándolo y volviendo a R1.

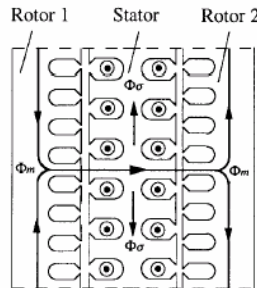


Figura 20. Máquina NS de rotores exteriores.

En el primer tipo de máquina el estator es de mayor longitud, puesto que tiene que permitir que los flujos de ambos circuitos se cierren a través de él. Tiene por lo tanto más hierro, pero el hierro en el rotor es menor porque el flujo es menor, además la inercia del rotor es menor.

En el segundo tipo, el estator tiene una anchura marcada por las profundidad de las ranuras (si es ranurado) y por la resistencia mecánica necesaria para alojarlas. Por el contrario la cantidad de hierro en ambos rótores es mayor puesto que el flujo es mayor, siendo por tanto mayor también su inercia.

El cuadro que se muestra a continuación resume la clasificación que se ha expuesto en este capítulo.

Clasificación Máquinas de flujo axial	Máquina síncrona De imanes permanentes (AFPM)		Máquina asíncrona (AFIM)	
	Máquina ranurada (AFSM)	Máquina sin ranuras (AFSLM)	Máquina ranurada (AFSM)	Máquina sin ranuras (AFSLM)
	Máquina NN	Máquina NS	Máquina NN	Máquina NS
	Rotor interior	Rotor exterior	Rotor interior	Rotor exterior
	Una etapa	Una etapa	Una etapa	Una etapa
	Multietapa	Multietapa	Multietapa	Multietapa

Figura 21. Clasificación de las máquinas axiales.

En rojo están marcadas las máquinas industriales más empleadas, así como a las que se está dedicando mayor esfuerzo de investigación.

En azul se marca la tipología de máquinas sobre las que se está trabajando en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona.

Otro tipo de clasificación que se podría añadir a la anterior consiste en diferenciar entre máquinas con hierro y máquinas donde el hierro desaparece completamente del estator. Se pueden encontrar referencias a este tipo especial de máquinas, de las que se hablará más adelante en [4] [17] [40] [43] [52] [71] .