

4. APLICACIONES DE LA MÁQUINA DE FLUJO AXIAL. ESTADO DEL ARTE

Como se mencionó al inicio de la tesis los motores axiales fueron los primeros en desarrollarse por su concepción intuitiva, pero caen en descenso a partir de 1870 debido sobre todo a las dificultades de fabricación existentes al inicio del desarrollo de las máquinas eléctricas. Las ventajas de las máquinas axiales se presentan cuando se dan las siguientes condiciones:

- Elevado número de polos
- Baja velocidad
- Geometría exterior con pequeña longitud comparada con el radio
- Geometrías con radio interior y exterior similares
- Grandes radios
- Elevado número de discos

El estado actual de desarrollo en que se encuentran este tipo de máquinas es el que se muestra en la tabla siguiente,

Aplicación	Ventajas	Estado
Micromotores	Estructuras Mult.-etapa	Prototipo
Grabadores vídeo y lectores de disco	Ahorro de espacio	En uso
Motores sin cojinetes	Control simultáneo de par y posición	Prototipo
Ventiladores	Ahorro de espacio	En uso
Motor de ascensores	Tracción directa y ahorro de espacio	En uso
Coches eléctricos	Par específico alto y ahorro de espacio	En uso
Volantes de inercia	Altas velocidades	Prototipo
Alternadores turbina de gas	Comportamiento mecánico a alta velocidad y posibilidad multi-etapa	Prototipo
Generadores eólicos	Tracción directa y ahorro de espacio	En uso
Propulsión naval	Elevada potencia específica	En uso
Máquinas superconductoras sin hierro	Mejor aprovechamiento del campo magnético	Investigando
Propulsión aeronáutica en aviones especiales (estratosféricos)	Reducción del peso	Investigando

En los apartados siguientes se expone el estado del arte en que se encuentren diferentes aplicaciones, empezando por aquella a la que se le han dedicado más recursos, el automóvil.

4.1. El coche eléctrico

Debido a la mayor conciencia social medioambiental, el empleo de energías alternativas para la tracción de vehículos ha experimentado un fuerte impulso en los últimos 10-15 años. El desarrollo de vehículos eléctricos está siendo objeto de investigación por parte de todos los grandes fabricantes de automóviles.

En la actualidad ya están disponibles en el mercado vehículos híbridos, que combinan motor térmico y eléctrico, como por ejemplo el último coche lanzado al mercado por TOYOTA. El hecho de que estos primeros vehículos sean híbridos, se deben a la dificultad que implica la inclusión de baterías en los coches, así como la falta de una infraestructura de puntos de carga para vehículos eléctricos, debido a la novedad que suponen.

A continuación se dan las características normales especificadas por los fabricantes de coches para pequeños vehículos eléctricos (no híbridos) [74] .

Velocidad punta en carretera plana	120 km/h
Aceleración (0-50 km/h)	9 s
Voltaje de la batería	180 V
Peso en vacío	550 kg
Carga máxima (3 personas + 40 kg)	250 kg
Peso máximo	800 kg
Área frontal	1,5 m ²
Coeficiente de arrastre aerodinámico (Cx)	0,35
Radio de rodadura de las ruedas	30 cm
Factor de sobre velocidad	1,2

4.1.1. Características de la tracción en automóviles

Como se ha comentado en capítulos anteriores los motores axiales son particularmente adecuados para esta aplicación, ya que su elevada densidad de par y la posibilidad de tener bajas velocidades nominales permite su conexión directa a la rueda. La ventaja inmediata que se presenta es la eliminación del diferencial mecánico, con el ahorro en coste y pérdidas mecánicas que ello supone.

La característica fundamental para los automóviles es que el sistema de tracción debe regular la velocidad en las ruedas cuando se gira o se toma una curva. Cuando se emplean motores térmicos esto se consigue mediante el empleo de un diferencial mecánico de relación 1, con lo que idealmente se consigue mantener el mismo par en todos los ejes con independencia de la velocidad a la que gira cada uno

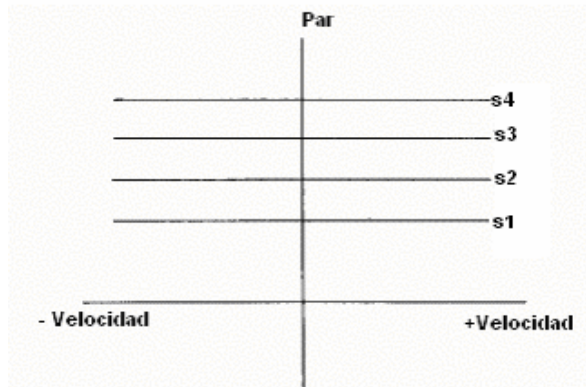


Figura 73. Característica de par ideal de un diferencial mecánico.

De acuerdo a las características dadas para los vehículos eléctricos en el apartado anterior, la velocidad de base (ω_b) es de 500 rpm desarrollando un par de 190 Nm, con una velocidad punta (ω_m) de 1500 rpm. La característica par velocidad a cumplir es la siguiente.

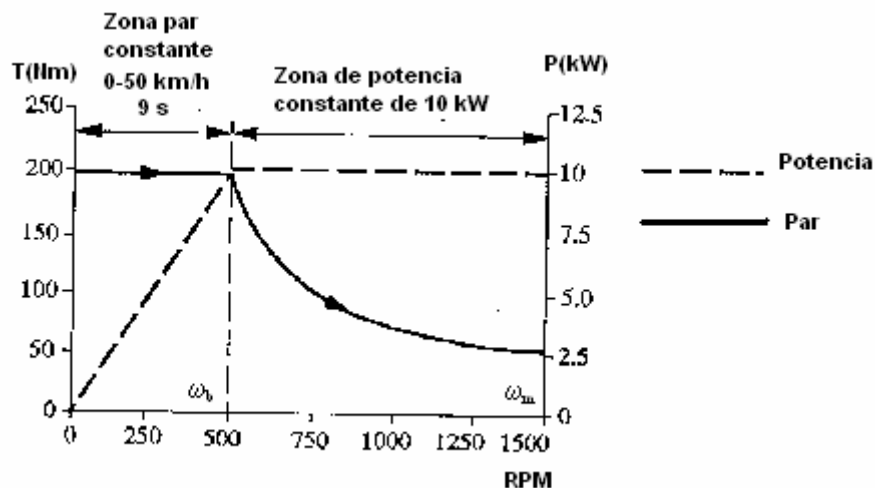


Figura 74. Característica de par de un automóvil.

Durante la fase de aceleración se aumenta la potencia progresivamente hasta llegar a la potencia nominal. En esta fase se necesita vencer el peso del vehículo y sus inercias para llevarlo a la velocidad de aceleración (50 km/h) por lo que se mantiene el par constante. Una vez alcanzada esta velocidad,

donde ya se han compensado las inercias, ya no es necesario mantener el par nominal de la máquina, por lo que se sigue aumentando la velocidad a base de reducir el par, es decir manteniendo la potencia constante.

La potencia consumida en un vehículo que se desplaza a velocidad constante a través del aire se debe a dos conceptos:

- Pérdidas de rodadura. Debidas a pérdidas en la transmisión, fricción en cojinetes y pérdidas por histéresis en las gomas de la rueda (las más importantes). Las dos últimas requieren para vencerlas una fuerza proporcional a la masa del vehículo, siendo unas pérdidas proporcionales a la velocidad.
- Pérdidas aerodinámicas. Debidas a la fricción del cuerpo del vehículo con el aire y a la fricción del aire con las ruedas.

La potencia empleada para mover al vehículo tiene la siguiente expresión [81] ,

$$P = m \cdot C_{rr1} \cdot V + n \cdot C_{rr2} \cdot V^2 + \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot C_d \cdot A \cdot V^3 \quad (4.1)$$

m: peso del vehículo (kg)

N: número de ruedas

ρ_a : densidad del aire (kg/m³)

A: área frontal del vehículo (m²)

C_{rr1} : coef. de pérdidas de rodadura (m/s²); C_{rr2} : coef. de pérdidas en ruedas (kg m /s)

C_d : Coeficiente de arrastre.

Diferenciando la expresión anterior respecto al peso del vehículo **m**, se obtiene el criterio de coste en el vehículo con el incremento de peso.

$$\frac{\partial P}{\partial m} = C_{rr1} \cdot V \quad (4.2)$$

4.1.2. Tipología de máquina axial para tracción en automóviles.

Dos son los tipos de máquinas a los que más esfuerzos se han dedicado para su aplicación en automóviles, las máquinas de inducción (AFIM) y las máquinas de imanes permanentes (AFPM).

La configuración inmediata consiste en que cada rueda motriz lleve acoplada su máquina y ambas sean alimentadas por una fuente común.

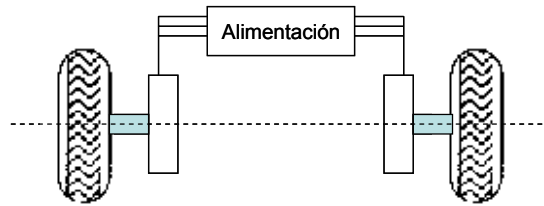


Figura 75. Concepto de coche eléctrico, con un motor axial por rueda motriz y alimentados con una misma fuente.

Sin embargo, y dada la especial geometría de las máquinas axiales, se puede emplear una configuración AFERM, con dos rótores exteriores acoplados a cada rueda, con un único estator. Con ello se consigue además optimizar el rendimiento de la máquina, ya que se aumenta la cantidad de cobre activo que produce par.

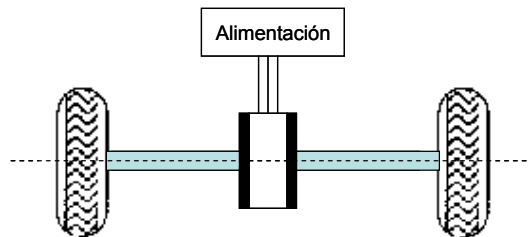


Figura 76. Concepto de rueda motriz con un único estator y un rotor por rueda motriz.

Para conseguir una máquina como la anterior, sería necesario que fuera de 8-12 polos para conseguir la velocidad de base de 500 rpm, en una configuración que podría ser de imanes permanentes o de inducción. En ambos casos la configuración podría ser NN ó NS, es decir con flujo común atravesando el estator en el primer caso, o con el flujo común cerrándose a través del yugo del estator en el segundo.

La configuración NS implica un estator más pequeño y unas cabezas de bobina menores, lo que supone menores pérdidas en el cobre (el bobinado es toroidal), menores pérdidas en el hierro y menor peso del conjunto.

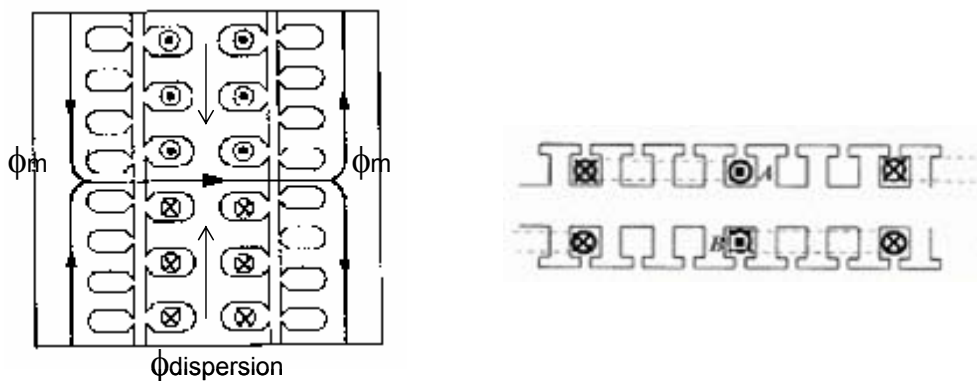


Figura 77. Configuración de bobinado NS.

La configuración NN implica un bobinado tipo sector, con mayores cabezas de bobina, mayores pérdidas en el hierro y mayor peso del conjunto. Como factor positivo presenta un factor de bobinado mejor que la NS, con menor pulsación de par debido a que la onda de FMM generada tiene menos componentes armónicas. A pesar de esto último la configuración NN presenta más ventajas, por lo que es la seleccionada habitualmente.

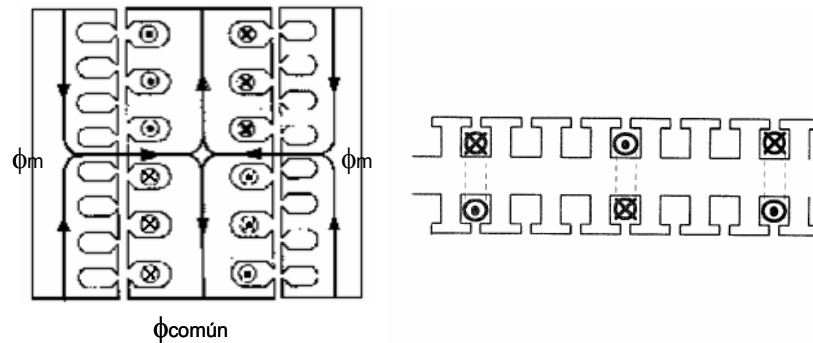


Figura 78. Configuración de bobinado NN.

En ambos casos se escogen máquinas con estator ranurado en vez de "slotless", ya que la reducción en inductancia que se produce hace que la operación en la zona de potencia constante se vea reducida. Esto que en la máquina de inducción puede no llegar a tener excesiva importancia, en la máquina de imanes permanentes la inhabilita completamente, ya que el gran entrehierro reduce mucho la inductancia.

El rotor en máquinas de inducción está habitualmente formado por un disco ferromagnético con barras de cobre o aluminio inyectado a presión, cortocircuitados por un anillo exterior y otro interior. En el Departamento de Ingeniería Eléctrica se trabajó con rotor sólido de aluminio.

En máquinas de imanes permanentes el rotor es un disco de acero sobre el que se montan los imanes permanentes, alternando N y S.

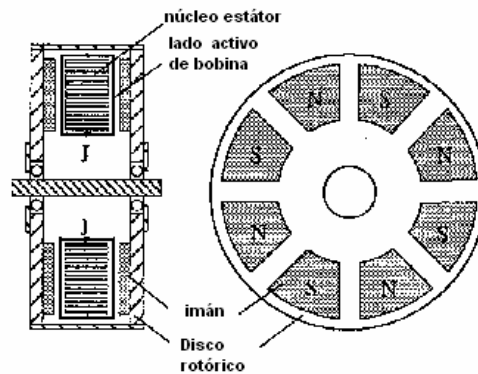


Figura 79. Máquina de imanes permanentes.

4.1.3. Circuito equivalente para la máquina de inducción

El reparto de flujos en la máquina es el que se muestra en la figura adjunta, donde se pueden ver los flujos de dispersión, entrehierro y totales.

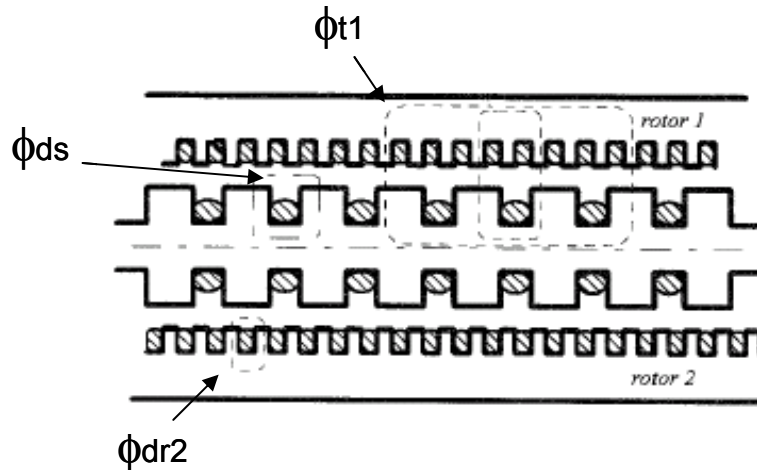


Figura 80. Flujos de estator y rotor en la máquina axial.

Los circuitos magnéticos y eléctrico se muestran en la figura adjunta [87], donde Λ es la permeancia (inverso de la reluctancia), R_s la resistencia del estator, R_r la del rotor, s el deslizamiento, L_m la inducción mutua, L_{dr} inductancia de dispersión del rotor, L_{ds} la del estator, R_o la resistencia de magnetización. Las bobinas de los dos estatores están conectadas en serie, aunque estuvieran conectadas en paralelo la explicación sería la misma.

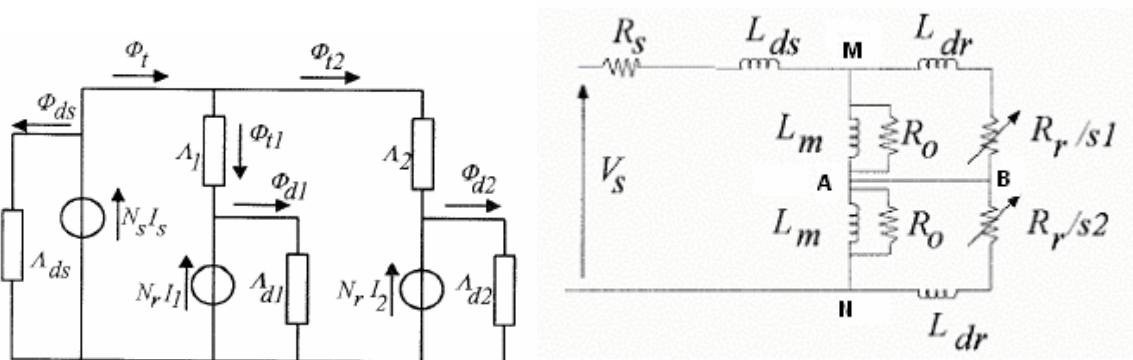


Figura 81. Modelo equivalente de la máquina axial, modelo magnético (izq.) y eléctrico (der.).

Cuando el coche circula en línea recta el flujo se reparte en dos partes iguales, estando los dos rótores en las mismas condiciones magnéticas. Cuando se entra en una curva, suponiendo que la frecuencia de alimentación es constante, la rueda exterior (rotor 1) aumenta su velocidad disminuyendo su

deslizamiento y aproximándose a la velocidad de sincronismo. El resultado es una disminución de corriente en el rotor exterior, lo que implica la correspondiente reducción de la corriente debida a la reacción de inducido en el estator. El flujo del estator tiende a desplazarse hacia éste rotor, ya que en el otro hay una mayor corriente, deslizamiento y reacción de inducido en el estator, puesto que su deslizamiento ha aumentado (disminuye su velocidad).

Puesto que la tensión y frecuencia de alimentación se mantienen constantes, el flujo total se mantiene constante, esto implica que al aumentar el flujo en el rotor 1 se produce un incremento de su par, mientras que el flujo en el rotor 2 disminuye y por tanto el par aplicado.

Con el circuito eléctrico b), la explicación es análoga, cuando el rotor 1 aumenta su velocidad (s_1 disminuye), la resistencia equivalente rotórica disminuye, por lo que la corriente magnetizante del rotor 1 aumenta, esto hace que V_{MA} aumente lo que da como consecuencia que V_{AN} disminuya (se supone que la potencia se mantiene constante porque en la curva no ha variado la velocidad lineal del coche). El hecho de que V_{AN} disminuya junto con el que la rueda interior (rotor 2) haya aumentado su deslizamiento y por tanto la corriente magnetizante haya disminuido (flujo), implica que el par en ella disminuye a su vez.

La relación entre los pares desarrollados por las dos ruedas viene dado por la siguiente expresión que es suficientemente aproximada,

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{s_2 \cdot \left(\frac{R_r}{s_2}\right)^2 + \omega_e^2 \cdot (L_{dr} + L_m)^2}{s_1 \cdot \left(\frac{R_r}{s_1}\right)^2 + \omega_e^2 \cdot (L_{dr} + L_m)^2} \quad (4.3)$$

ω_e : frecuencia angular de la corriente estática

Cuando $s_1 = s_2$ se tiene $T_1 = T_2$. Se pueden dar casos especiales,

$$\frac{R_1}{s_1}; \frac{R_2}{s_2} < X \Rightarrow \frac{T_1}{T_2} \approx \frac{s_2}{s_1} \quad (4.4)$$

$$\frac{R_1}{s_1}; \frac{R_2}{s_2} > X \Rightarrow \frac{T_1}{T_2} \approx \frac{s_1}{s_2} \quad (4.5)$$

El primer caso es el que se aplica al diferencial eléctrico, es decir, que dispone de más par la rueda más rápida, mientras que el segundo caso correspondería a todo lo contrario. Puesto que la reactancia

suma de la dispersión del rotor y la de magnetización siempre es mayor que la resistencia, el segundo caso no se da en condiciones normales.

4.1.4. Caso de máquina de imanes permanentes

La mayor limitación de las máquinas de imanes permanentes es la ausencia de regulación del campo, que permita a estas máquinas ir más allá de la velocidad de par máximo.

Las máquinas se operan a $\text{Volt/Hz} = \text{cte}$, en la zona de aceleración, donde se incrementa la velocidad hasta la velocidad de base (ω_b). Una vez se alcanza ésta se opera a $\text{Volt} = \text{cte}$ con el fin de debilitar el campo a velocidades superiores, para lo que se emplea el control vectorial.

El riesgo que tiene esta forma de operar lo causa las elevadas corrientes de desmagnetización en el eje directo de la máquina, que para valores muy elevados puede dañar los imanes imposibilitando que vuelvan a su punto de operación original. Las elevadas corrientes de eje directo aumentan además de forma considerable las pérdidas en el cobre.

Por tanto al emplear máquinas de imanes permanentes su diseño debe ser muy ajustado para evitar dañar los imanes y no penalizar de forma grave el rendimiento.

Una solución al problema anterior consiste en emplear máquinas multietapa, con sus devanados conectados de forma que sea posible cambiar su conexionado de serie a paralelo durante la operación de la misma.

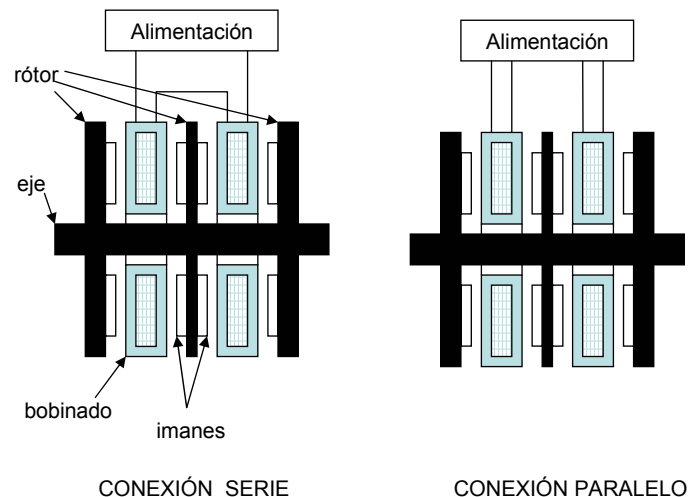


Figura 82. Conexión de los etapas de un motor multietapa en serie y paralelo.

Para una potencia dada del inversor, que está dimensionado para la potencia de par máximo a la velocidad de base, se puede ampliar el campo de velocidades conmutando el bobinado de serie a paralelo cuando se supera la velocidad de base.

Hasta llegar a esta velocidad se emplea toda la corriente que puede dar el inversor en producir el par nominal de la máquina con la finalidad de llevar al vehículo lo más rápidamente posible hasta ella. Cuando se está próximo a alcanzarla y, por tanto, la F.E.M. de la máquina está próxima a la tensión de salida del inversor, se conmuta a conexión en paralelo. Esto provoca que automáticamente la tensión en bornes del motor pase a ser la mitad, con lo que ahora se dispone de la mitad de la tensión de salida del inversor para seguir aumentando la velocidad hasta el doble de la velocidad de base.

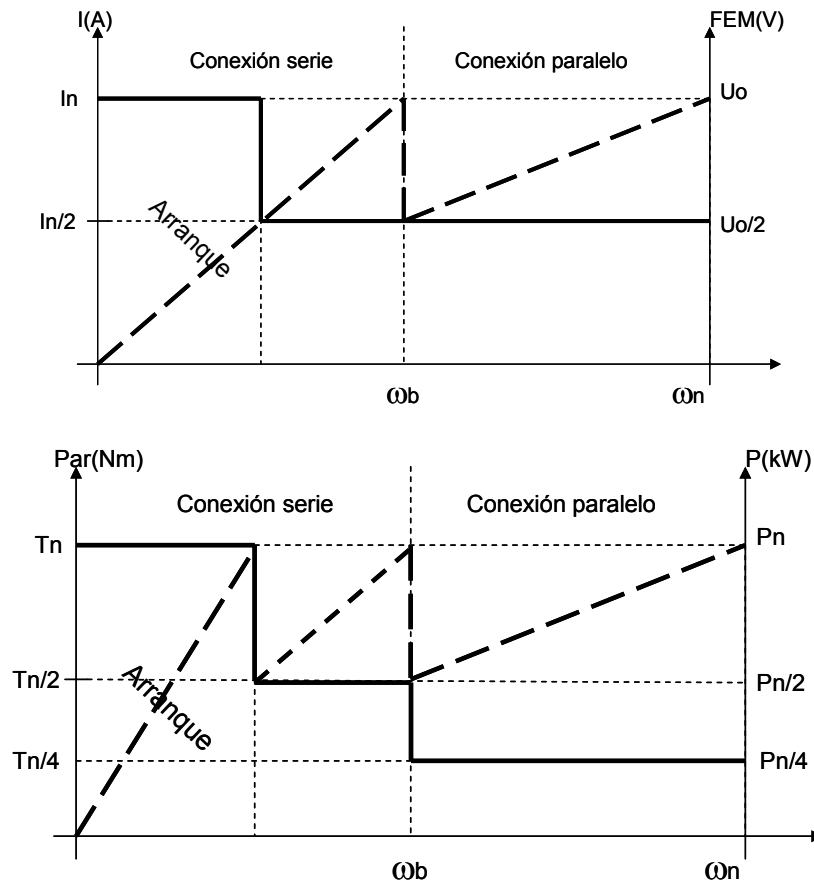


Figura 83. Aumento de velocidad por encima de la de sincronismo mediante cambio de conexión serie-paralelo de las etapas de un motor multietapa.

Otra forma de superar velocidades más allá de la velocidad de base se ha planteado en [44] y consiste en incluir en el rotor un devanado adicional de corriente continua para controlar el flujo en el entrehierro.

La máquina planteada es de doble rotor con el estator entre ellos, existen dos fuentes de campo, los imanes permanentes de los rotors y el devanado de corriente continua del estator. Los imanes se encuentran repartidos al tresbolillo sobre cada rotor, con todos los polos N en la periferia y los S en el interior. El estator se compone también de dos discos ranurados concéntricos, entre los que se sitúa el devanado de continua.

Mediante la corriente DC aplicada a éste devanado adicional se puede reforzar o disminuir el campo generado por los imanes cambiando la orientación del mismo, en vez de oponerse a él como se realiza en el control vectorial habitual, mediante la inclusión de una corriente de eje directo que se opone al campo de los imanes.

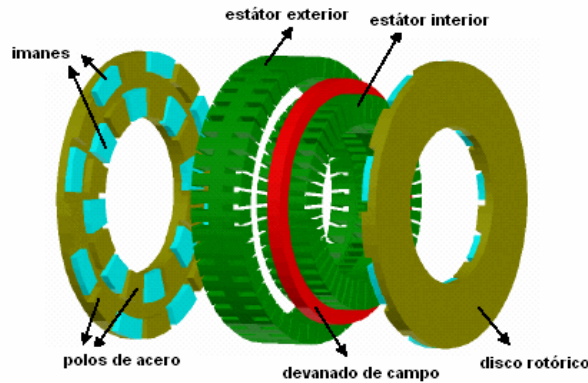


Figura 84. Máquina de imanes permanentes de rotor exterior, con devanado de continua para control de campo.

Cuando se aplica una corriente positiva al devanado DC el flujo generado se cierra por los polos de acero de los rótores en sentido contrario al generado por los imanes, con lo que el flujo medio en el entrehierro disminuye.

Si se aplica una corriente positiva, provoca que en los polos de acero del rotor aparezca un flujo de la misma dirección que el del imán correspondiente a su polo, reforzando y, por tanto, aumentando el flujo medio en el entrehierro.

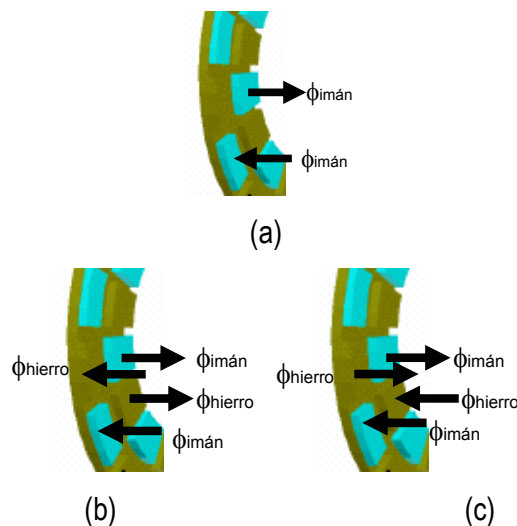


Figura 85. Control de campo cambiando la orientación del campo resultante. (a) sin campo DC, (b) con campo opuesto, (c) con campo aditivo.

4.1.5. Volantes de inercia

El empleo de volantes de inercia en coches eléctricos tiene la finalidad de almacenar energía que se devuelve en el momento de arranque del motor, durante las operaciones normales de paro y marcha del tráfico urbano. Su empleo supone que se reduzca el pico de corriente que se pide a la batería en el arranque, lo que redundaría en un alargamiento de su vida útil. Además el número de ciclos carga, descarga de un volante de inercia es ilimitado.

En el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la UPC se ha construido un volante de inercia conectado a un motor de imanes permanentes que constituye el elemento motor de un coche eléctrico SEAT 600 construido en el departamento [130].

Cargando externamente este volante de inercia se ha conseguido mover el coche inicialmente parado una distancia de 14 m. El esquema del sistema construido y ensayado es el siguiente,

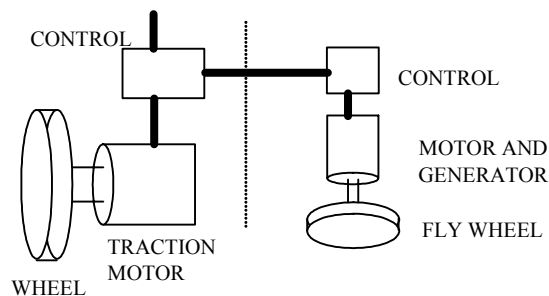


Figura 86. Esquema experimental del volante de inercia como acumulador cinético.

El sistema presenta las siguientes ventajas,

- Es un sistema compacto y robusto.
- No afecta al medio ambiente.
- Rápidos ciclos de carga y descarga.
- Capaz de resistir elevados picos de potencia.

Pero también los inconvenientes de la existencia de las pérdidas por fricción y las pérdidas en la máquina.

El sistema ensayado consistió en descargar la energía sobre un motor axial MAVILOR de imanes permanentes de 800 W de las siguientes características.

- Velocidad nominal: 3000 rpm
- Tensión nominal: 90V
- Corriente nominal: 10.7 A
- Par nominal: 2.56 Nm
- Par máximo: 15.38 Nm
- Momento de inercia: 0.00082 Kgm²
- Peso: 8 Kg

Este motor es el elemento tractor del SEAT 600 eléctrico. El volante de inercia consistió en un disco de acero de 17 kg de peso, 200 mm de radio y 20 mm de espesor. El volante se aceleró mediante un motor de continua hasta su velocidad nominal que eran 4000 rpm y a continuación se descargó la energía almacenada en el volante de inercia sobre el motor tractor del vehículo.

El ensayo se realizó para diferentes tensiones de alimentación del motor tractor del coche, observando que la energía descargada aumenta con la tensión de alimentación de la descarga. Los resultados obtenidos fueron,

Alimentación (V)	Tiempo de descarga (s)	Tensión de pico de descarga (V)	Corriente de pico de descarga (A)	Distancia recorrida (m)
42	15	10	20	0.31
46	20	25	23	-
48.6	20	12	25	-
56	21	20	10	0.58
64	33	45	12	4
71.2	35	50	27	8
72.2	37	52	28	-
75	40	65	30	12
75.5	40	62	30	14

Figura 87. Distancias recorridas por el 600 en función de la U de alimentación.

Otro tipo de volantes de inercia referenciados en la literatura incorporan el volante de inercia en el rotor del motor, con lo que resulta en una estructura muy robusta, pero que presenta problemas de evacuación del calor y pérdidas de fricción [51].

4.2. Ascensores

A diferencia de los coches eléctricos, la aplicación de motores axiales en aplicaciones de elevación es reciente y su desarrollo ha sido relativamente rápido, apoyándose en el empleo de imanes permanentes comerciales de campo elevados (hasta 1.8 T).

En la actualidad ya existen ascensores con motores axiales que se venden e instalan, como referencia valga la línea de ascensores ECO-DRIVE de la marca KONE. La aplicación más inmediata que han encontrado es en baterías de ascensores, donde se emplean máquinas multietapa de gran diámetro, consiguiendo grupos tractores de hasta 8 cabinas con una sola máquina de la que cuelga una cabina por etapa.

El resultado es una máquina que ocupa un espacio mucho menor que las máquinas convencionales, debido fundamentalmente a la elevada densidad de par de estos motores.

Para mayor información se remite a visitar la página Web de KONE ascensores.

4.2.1. Características de los ascensores

El sistema de tracción convencional de un tren elevador de ascensores consiste en un motor convencional de alta velocidad, conectado mediante un reductor mecánico a la cabina del ascensor. Un sistema como este presenta la desventaja del mantenimiento debido al elevado número de componentes mecánicos, lubricación, y sobre todo ruido. Esto último es de gran importancia, puesto que el cajón del ascensor suele atravesar todo el edificio en altura, comportándose como un tubo de órgano amplificando los ruidos a lo largo de todo el edificio.

Además de lo anterior, en sistemas convencionales se requiere un espacio en la planta de servicio del edificio para colocar el sistema tractor del ascensor. En ocasiones este espacio simplemente no existe, por condicionantes de arquitectura o por tratarse de edificios rehabilitados donde no había ascensor.

Existen soluciones que no requieren cuarto de ascensor en la planta técnica del edificio:

- Ascensores hidráulicos: su velocidad está limitada a 0.63 m/s y requieren cuarto de ascensor en el sótano del edificio.
- Motores lineales de velocidad variable empleados como contrapeso: esta solución es significativamente más cara que cualquiera de las anteriores.

- Ascensores con motor de inducción y reductor acoplados a la cabina: generalmente suelen ser ruidosos y de difícil mantenimiento.

Como resumen de las características ideales de un sistema de tracción para ascensores serían:

- Sin cuarto de ascensores (espacio).
- Sin reductor mecánico (ruidos).
- Compacto, ligero y plano.

Las características anteriores las pueden cumplir los motores radiales, pero su coste es muy elevado. Los motores axiales cumplen “naturalmente” todos los requerimientos anteriores, el condicionante de coste es desconocido, puesto que la única aplicación comercial existente en el mercado la posee un solo fabricante y es reciente.

4.2.2. Características de la máquina y drivers

Como se ha descrito hasta ahora los parámetros iniciales de diseño de una máquina axial de imanes permanentes son:

- Diámetro exterior (D_o).
- Número de polos ($2p$).
- Característica de los imanes (B_r , dimensiones).

Dado que estas máquinas pueden ser de gran diámetro, los esfuerzos mecánicos entre discos, cojinetes y características constructivas son muy importantes. En [8] se puede encontrar detalles constructivos de una máquina de este tipo donde se ha tenido muy en cuenta la fabricabilidad, robustez y mantenibilidad de la máquina.

Los ruidos se originan en la máquina por las pulsaciones de par, siendo el par de ranura el más importante de las componentes de pulsación. Con el objetivo de minimizar esta pulsación, la mejor opción para estas máquinas es emplear estatores sin ranuras, con bobinados toroidales realizados sobre el toro estatórico y recubiertos de epoxy para garantizar su rigidez mecánica y transmisibilidad térmica.

Para máquinas de gran diámetro, y dado que el valor de K_r es del orden de 0.7, se obtienen máquinas cuyos estatores y rótores son coronas de material magnético o ferromagnético en vez de discos.

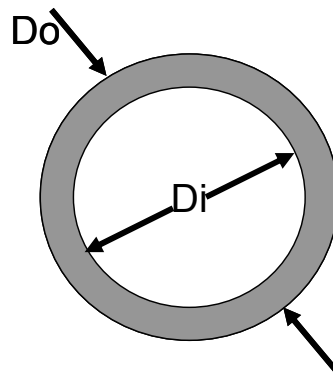


Figura 88. Diámetros interior y exterior en máquinas de gran diámetro.

Mecánicamente estos circuitos magnéticos, por sí mismos, son débiles, por lo que se tienen que montar sobre estructuras más rígidas que se fijen a los ejes de transmisión. Habitualmente se suele emplear el aluminio, por su baja densidad, pero hay que recordar la posibilidad de que se produzca una disminución de rendimiento por la aparición de corrientes parásitas.

El par que se obtiene en este tipo de máquinas proviene de la interacción del campo generado por los imanes, con la parte activa de los conductores del estator (tramo radial enfrentado al imán) cuando éstos son recorridos por un sistema de corrientes trifásico, que genera un campo giratorio que interacciona con el anterior, siendo el desfase entre las dos ondas de campo la que genera el campo.

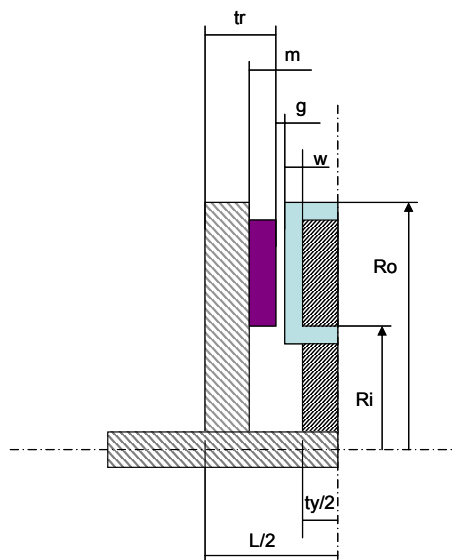


Figura 89. Sección de una máquina de imanes permanentes con doble rotor exterior.

Los imanes a emplear deben ser del tipo Nd-Fe-B, para obtener una densidad de flujo elevada. La expresión del par sería la siguiente,

$$T = 2 \cdot \pi \cdot B \cdot q_i \cdot R_o^3 \cdot K_r (1 - K_r^2) \quad (4.6)$$

$$B = B_r \cdot \frac{m}{m + g + \frac{t_y}{2}} \quad (4.7)$$

B_r : campo remanente del imán (T)

B : campo medio en el entrehierro (T)

q_i : carga en el diámetro interior del rotor (A/m)

R_o : Radio exterior de la máquina (m)

El ciclo de arranque paro de este tipo de motores no presenta una problemática tan grande como en el coche eléctrico, por lo que el control de campo vectorial a través de un convertidor PWM regulado por corriente da la funcionalidad deseada. Hay que volver a hacer hincapié en que la máquina debe ser dimensionada junto con el convertidor, de tal manera que no se apliquen corrientes de desmagnetización que puedan afectar de forma irreversible a los imanes permanentes, sea de forma instantánea o por su uso continuado.

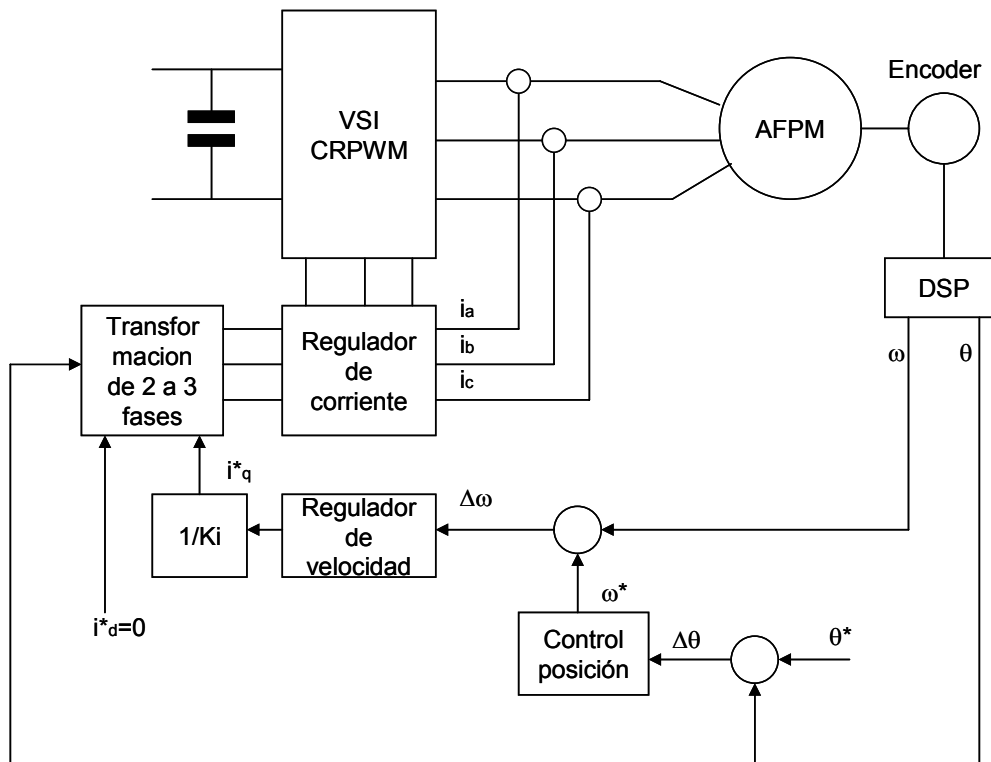


Figura 90. Esquema de regulación para control vectorial de la máquina axial.

4.3. Aerogeneradores

Los generadores convencionales de los aerogeneradores operan generalmente a altas revoluciones, necesitando trenes reductores para adecuarlas a la velocidad de la turbina. Este tipo de solución, a parte de ruidosa, requiere mantenimiento constante y mantener la lubricación, lo que redonda en un coste elevado.

Cuanto mayor es la potencia de la turbina más baja es su velocidad de giro, por ejemplo, las turbinas de 300 kW operan a velocidades alrededor de 40 rpm, mientras que las de 10 kW tienen una velocidad de operación de 400-800 rpm [14].

Debido a la especial configuración de este tipo de generación, donde el generador se encuentra situado en la cumbre de una torre, el criterio de peso de la máquina es crítico. Los criterios generales para este tipo de generadores son:

- Bajo coste.
- Poco peso.
- Bajas velocidades de rotación.
- Elevados pares.
- Operación normal en régimen de velocidad variable.

De todo lo expuesto se deduce que las máquinas axiales, caracterizadas por su elevada densidad de par, y por la capacidad de poder incluir un elevado número de polos, se adecuan perfectamente a esta aplicación. Con la ventaja añadida de que empleando un elevado número de polos pueden conectarse directamente al eje de la turbina, sin necesidad de emplear reductores mecánicos.

4.3.1. Aplicación de máquinas axiales a los generadores

La velocidad de giro de las turbinas en los aerogeneradores está sujeta a un régimen variable impuesto por la velocidad del viento, que sigue una distribución de probabilidad de Weibull. Esta función de probabilidad depende de:

- El lugar donde se encuentra el aerogenerador.
- La velocidad media del viento.
- La velocidad nominal del viento.

Lo anterior significa, que estos generadores se deben diseñar para todo el rango de velocidades que proporciona el viento y no para un punto de operación específico.

Para cumplir con el primer condicionante de los aerogeneradores, el coste, la máquina axial que más se adecua es la de estator toroidal, sin ranuras y bobinado tipo toroidal. Además es conveniente que la construcción tanto de estator como de rotor sea modular, es decir, construir los polos por separado con el fin de poder emplear matrices y bobinadoras más sencillas y de mayor ratio de producción. Es decir, la máquina se construiría a base de pares de polos individuales, montados sobre fijaciones que presentasen las características mecánicas necesarias para resistir los esfuerzos de atracción entre polos.

Debido a que en este tipo de máquinas el bobinado está directamente en el entrehierro, se pueden inducir corrientes parásitas que pueden tener un valor elevado, por ello es conveniente emplear bobinas con un diámetro de conductor lo más pequeño posible, con el límite de la pérdidas en el cobre que se consideren adecuadas. Además en este tipo de bobinados hay que evitar hacer circuitos paralelos, ya que los desequilibrios pueden provocar, como se ha comentado en el capítulo 3, corrientes de circulación no deseadas, sobre todo en máquinas de imanes permanentes, donde ven directamente el campo generado por los imanes.

El empleo de conductores de Litz podría ser apropiado dadas la susceptibilidad frente a corrientes parásitas, pero su elevado coste prácticamente los descarta para esta aplicación. Lo que tal vez convendría no descartar es el trenzado de los conductores, con el fin de eliminar el efecto de campo cercano.

4.3.2. Características de diseño

Los generadores axiales existentes en la actualidad se han construido a base de imanes permanentes (AFPM) y estatores sin ranuras, al menos esas son la referencias de las que se dispone a día de hoy. Sirva como ejemplo las referencias [14] [75] [85] . Con el fin de equilibrar los esfuerzos axiales son de un estator situado entre dos rtores.

En este tipo de máquinas sin ranuras y grandes diámetros es conveniente que el campo (**B**) en el entrehierro no sea excesivamente elevado por dos motivos:

- Limitar las corrientes parásitas, puesto que los conductores activos están directamente en el entrehierro.
- Evitar excesivas fuerzas axiales durante el montaje de la máquina que puedan provocar desequilibrios durante el funcionamiento normal de la misma.

En sistemas como este de velocidad variable, donde se emplean imanes permanentes, la tensión y la frecuencia aumentan linealmente con la velocidad del viento (v), hasta los valores nominales, a partir

de ellos tanto tensión como frecuencia permanecen constantes. La expresión de la potencia en el eje de la turbina es [75]

$$P_{Turbina} = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot \pi \cdot R_t^2 \cdot v_t^3 \cdot C_p \quad (4.8)$$

$P_{Turbina}$: Potencia de la turbina (W)

ρ_a : densidad del aire (1.26 kg/m³)

R_t : Radio de la turbina (m)

v_t : velocidad de la turbina (m/s)

C_p : Coeficiente de potencia de la turbina (=0.3 aprox.)

Para media máquina el par y la correspondiente fuerza axial ejercida entre ellos viene dada por la expresión [75],

$$T = \pi \cdot B \cdot q_i \cdot R_o^3 \cdot K_r (1 - K_r^2)$$

$$F = \frac{\pi \cdot R_o^3 \cdot (1 - K_r^2) \cdot B^2}{4 \cdot \mu_o} = \frac{B}{4 \cdot \mu_o \cdot q_i \cdot R_o \cdot K_r} \cdot T \quad (4.9)$$

F : fuerza axial entre rotor y estator en una sola etapa

Las máquinas reportadas son equivalentes a las descritas para los ascensores, por lo que se aplica lo descrito para ellas y en general para las máquinas axiales, con la salvedad de que las estimaciones iniciales de diseño, basadas en las pérdidas admisibles en la máquina (rendimiento), deben adecuarse a la especial característica de que se debe diseñar para todo el rango de velocidades, haciendo intervenir la función distribución de probabilidad de Weibull.

$$P_T = T \cdot \int_{v_{\min}}^{v_n} P_X(v) \cdot W(c, v_m, v) \cdot dv + \int_{v_n}^{v_{\max}} W(c, v_n, v) \cdot dv \quad (4.10)$$

P_T : Pérdidas totales en la máquina (W)

T: tiempo (s)

W: función distribución de probabilidad de Weibull

c: constante dependiente del lugar donde se ubica el aerogenerador

v_m : velocidad media del viento (m/s)

v_n : velocidad nominal del viento (m/s)

Las pérdidas en el hierro y en el cobre deben incluir dentro de su análisis el régimen de funcionamiento de velocidad variable. Por ejemplo, las pérdidas en el cobre varían con la cuarta potencia de la velocidad del viento, las del hierro son una función polinómica de grado 2 y las debidas a corrientes parásitas varían con el cuadrado de la velocidad del viento [45].

4.4. Aplicaciones navales

El empleo de motores eléctricos navales ofrece ventajas respecto a los motores diesel o turbinas de gas, puesto que son más silenciosos y permiten escoger el lugar más adecuado para su colocación en el barco. Para este tipo de aplicaciones, las máquinas síncronas son las más adecuadas, ya que debido a las potencias de MW necesarias, los puentes de tiristores de conmutación natural son la opción económicamente más viable.

Al igual que en las aplicaciones anteriores, generalmente los motores eléctricos presentan velocidades mucho más elevadas que las de las hélices de propulsión, lo que hace necesario el empleo de reductores mecánicos.

Por lo anterior, las máquinas axiales a base de imanes permanentes constituyen la opción más adecuada para esta aplicación, ya que reúnen las características necesarias de velocidades bajas y elevadas densidades de par.

Las máquinas axiales más adecuadas son las AFERM de una etapa o multietapa, en función de la potencia y par que tenga que entregar la máquina.

Debido a la gran potencia de estas máquinas es deseable que sean modulares, ya que permitiría su rápida reparación, incluso su funcionamiento con algún bobinado fuera de uso. Esto tiene implicaciones en el proceso de fabricación y en los costes finales de la máquina.

En [11] y [22] se han descrito prototipos de máquinas con estator sin ranuras, que implican una mayor facilidad de fabricación, incluso la posibilidad de conseguir la modularidad descrita.

La máquina sin ranuras presenta por tanto las siguientes ventajas:

- Bajo coste.
- Posible realizar la máquina a base de módulos.
- Poco ruidosas, ya que eliminan el par de ranura.

El hecho de poseer una baja inductancia debido a la ausencia de ranuras, no permite realizar un control de campo eficiente en la máquina, pero dimensionándola adecuadamente se puede aplicar un control vectorial convencional.

Al tener diámetros muy grandes, los módulos polares son trapezoidales, lo que facilita aún más su fabricación. Incluso se puede alimentar cada sector individualmente constituyendo un conjunto trifásico a base de módulos monofásicos.

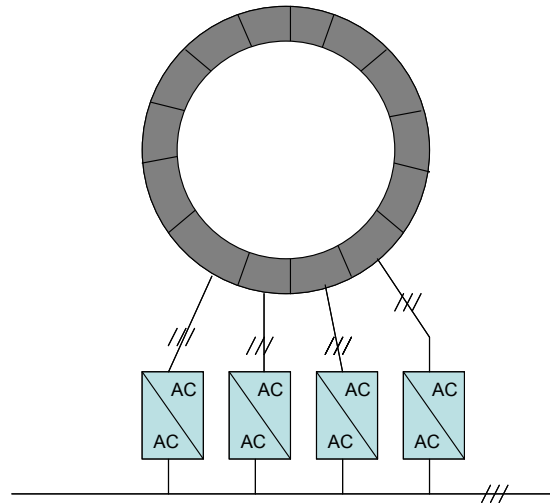


Figura 91. Máquina de gran potencia (MW) a base de sectores alimentados individualmente.

Una solución de este tipo es muy compacta y robusta ya que permite que los convertidores individuales sean de una potencia inferior, incluso permite el funcionamiento de emergencia con algún módulo dañado, puesto que el par total es la suma de los pares aportados por cada módulo.

Como se describió en el capítulo 3, en máquinas tan grandes el coeficiente K_r es dependiente del número de polos de la máquina, por lo que se han reportado valores óptimos de este coeficiente entre 0.7 y 0.8, que no coincide con el valor óptimo de 0.63 dado anteriormente.

Uno de los conceptos de trabajo en propulsión naval es el ahorro de combustible mediante la recuperación de energía que se encuentra en la estela generada por la hélice del barco. La recuperación se consigue por medio de una segunda hélice más pequeña que gira debido a esta estela recuperando parte de la energía entregada. Ya existen barcos que incorporan esta idea e incorporan esta segunda hélice llamada de contra-rotación (CRP en inglés).

Empleando motores que precisan acoplamiento mecánico a la hélice, la inclusión de la CRP implica mecanismos complicados a base de ejes intermedios, embragues, etc. Empleando una máquina axial los embragues son innecesarios, ya que sobre una misma máquina, mediante la disposición adecuada de las bobinas es posible tener campos giratorios de sentidos opuestos en caras opuestas de la máquina [22]. Esto permite que cada rotor vaya conectado a una hélice, que giran en sentidos opuestos.

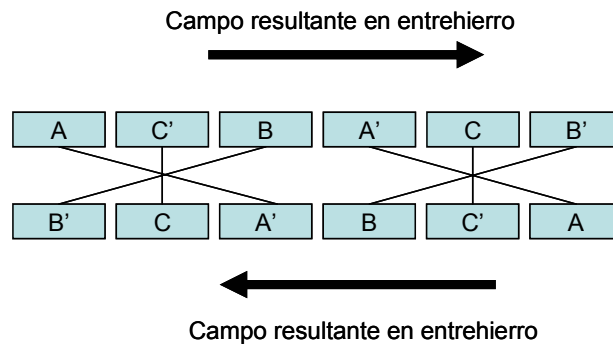


Figura 92. Recuperación de energía mediante campos giratorios de sentido opuesto mediante la conexión de devanados de ambas caras del rotor.

4.5. Aplicaciones aeronáuticas

Las aplicaciones aeronáuticas que se pueden encontrar en la literatura están en fase de investigación y son en aplicaciones especiales, como son plataformas de telecomunicaciones estratosféricas [4] [40]. El interés de su desarrollo se debe a la elevada densidad de par de las máquinas axiales, que combinado con nuevos materiales plásticos y metálicos resulta en motores compactos de muy bajo peso.

Peso y espacio son factores críticos en el mundo aeronáutico, por ello eliminar materiales metálicos y sustituirlos por elementos de densidades menores, como fibras o plásticos técnicos de altas prestaciones supone una problemática adicional cuando se aplica a las máquinas eléctricas, en el caso que nos ocupa, a las axiales.

En general la ausencia de material ferromagnético en estas aplicaciones implica unas bajas pérdidas en el hierro, pero unas pérdidas considerables debido a corrientes parásitas, puesto que los conductores están directamente expuestos en el entrehierro. Por ello se emplean diámetros de conductor lo más pequeños posibles, con la limitación de pérdidas en el cobre que se acepte como compromiso. No se ha reportado el empleo de conductores de Litz en estas aplicaciones, lo que no se debería descartar, puesto que el coste previsto de este tipo de motores no debe ser pequeño.

Las limitaciones de espacio (diámetro exterior) que se plantean en estas aplicaciones se compensan realizando máquinas multietapa, ya que ese consigue más par aumentando el número de etapas.

La configuración de máquina multietapa es como la que se muestra a continuación.

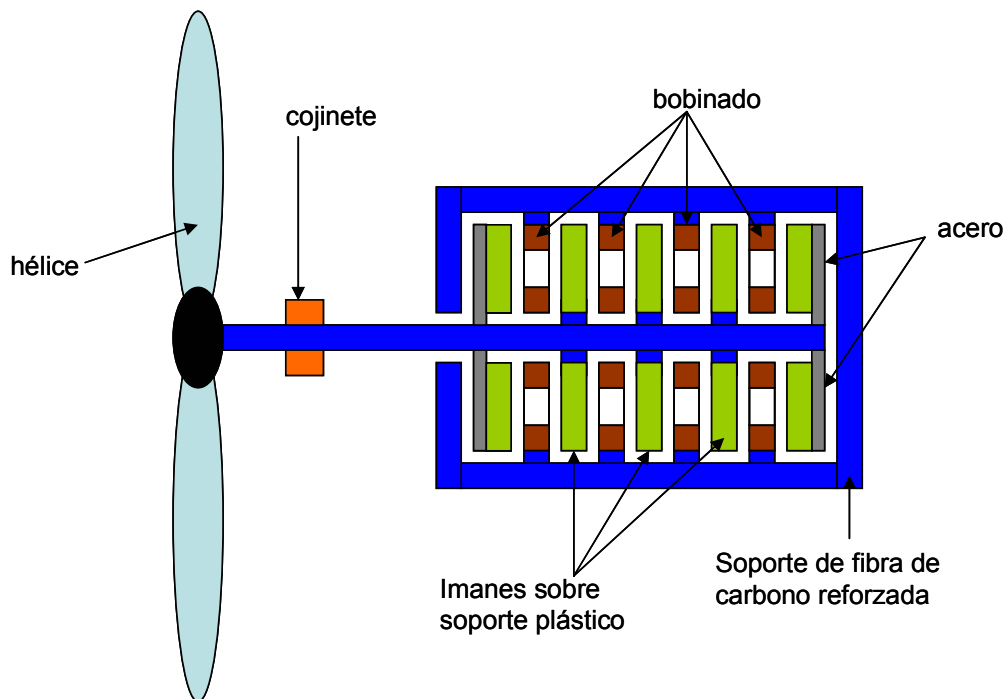


Figura 93. Concepto de motor multietapa para plataforma estratosférica alimentada por paneles solares.

Los requerimientos de potencia difieren bastante entre el despegue, tránsito a la órbita de navegación y régimen de vuelo. El mayor consumo de potencia se produce durante el despegue y la subida hasta la órbita de trabajo, una vez se alcanza ésta la potencia consumida se reduce a la cuarta parte.

El empleo exhaustivo de simulaciones para determinar el campo 3D es habitual en este tipo de aplicaciones.

4.6. Grupos electrógenos

La forma habitual de los grupos electrógenos es emplear un motor diesel acoplado a un generador síncrono con sus elementos de control correspondientes. La limitación que presenta el generador síncrono es que debe operar a una velocidad fija del generador diesel, ya que la frecuencia de salida está directamente ligada a la velocidad del motor.

$$f = \frac{n \cdot p}{60} \quad (4.11)$$

n: velocidad de giro del motor diesel (rpm)

El tiempo de respuesta del conjunto es lento, puesto que cuando se produce un aumento de carga pueden aparecer huecos de tensión y variaciones de frecuencia. Se deben a que el motor diesel no

puede aumentar la cantidad de combustible quemado con la rapidez suficiente para mantener la frecuencia del generador, lo que provoca la consiguiente bajada de velocidad del motor, asociada al hueco de tensión, debido a la lentitud de reacción de la corriente de excitación por las limitaciones del suministro eléctrico al control de excitación.

De igual forma, cuando se produce una pérdida brusca de carga se producen elevaciones de tensión y frecuencia debido a que el generador está sobreexcitado y el motor no reduce el paso de combustible con la suficiente rapidez.

Otro dato importante es que en general, el tamaño físico del generador suele ser superior respecto al del motor de combustión, para disponer de mayor potencia nominal y capacidad de suministro de energía reactiva.

Los problemas anteriores se pueden solucionar, en parte, añadiendo electrónica de control detrás del generador, es decir, pasando de AC a DC, estabilizando el nivel de continua a un valor de consigna fijo y realizando una posterior ondulación mediante un inversor PWM. Cuando se hace esto sería recomendable emplear un control de velocidad variable del motor de combustión [84], ya que se puede conseguir aumentar el rendimiento del conjunto optimizando el consumo de combustible del motor diesel.

A lo anterior se puede añadir una alimentación a través de batería o volantes de inercia tipo PILLER, con el fin de compensar los picos de potencia de los transitorios.

En un sistema de velocidad variable como el descrito sería más conveniente emplear un generador axial de imanes permanentes en lugar de un generador síncrono convencional, ya que presenta las siguientes ventajas:

- Empleando un generador sin ranuras, se tiene una menor inductancia del generador, que implica una menor distorsión de tensión, y mejor conmutación del convertidor.
- Mejor respuesta a picos de potencia debido a su mayor inercia.
- Conexión directa del generador al motor diesel, debido a que aumentando el número de polos se puede adecuar a su velocidad.
- Mejor ventilación debida a la geometría del motor, ya que realizando agujeros en el disco de soporte de los imanes se pueden crear canales de ventilación.
- Mayor densidad de par, con la consiguiente reducción de tamaño del generador.