

## 4.- CARACTERIZACIÓN DE UN MOTOR EXISTENTE (prototipo Bosch-5)

---

### 4.1.- DESCRIPCIÓN

Uno de los prototipos que estaban pendiente de estudio era el prototipo Bosch-5. Su misión era mejorar la parte tractora. Tiene cojinetes convencionales a bolas para independizar los fenómenos de levitación.

Se parte de dos semiestatores trifásicos:

Estos estatores trifásicos son circulares, de  $\phi_e = 170$  mm,  $\phi_i = 84$  mm y un espesor de culata de unos 18 mm. Cada estator consta de 25 ranuras, una de las cuales está vacía para evitar así el cosido magnético, ya que originariamente está diseñado por Mavilor Motors S.A. como servomotor síncrono de ocho polos con rotor de disco de baja inercia y con imanes permanentes de SmCo. Estos semiestatores se utilizan comercialmente en servomotores Brushless de baja inercia y altas prestaciones de 5 kW.

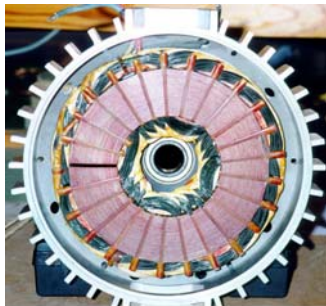
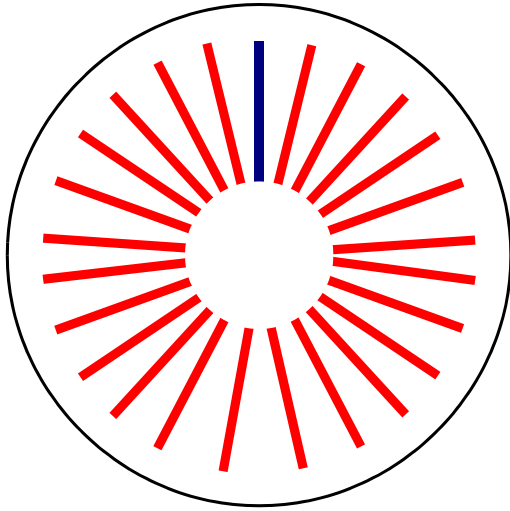


Foto 6: Vista del estator. Se observa la ranura vacía.



Hay un devanado imbricado de doble capa, acortado 1/25 de ranura debido a la ranura vacía. Las cabezas de bobina y ranuras activas configuran por cada fase un devanado en “Cruz de Malta”. La estructura es habitual en las máquinas actuales de flujo axial como el modelo MA-55, y es una de las mejores disposiciones para conseguir una onda de FMM lo más senoidal posible, en un compromiso con todos los factores en juego.

Dibujo 4.1: Esquema de ranuras del estator Mavilor.

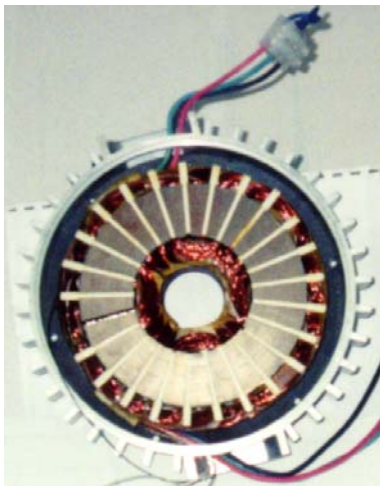


Foto 7: devanado de los estatores de los motores de flujo axial en estudio

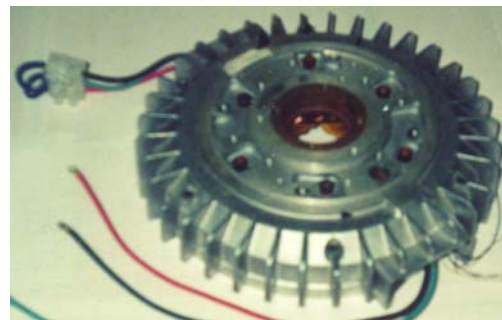
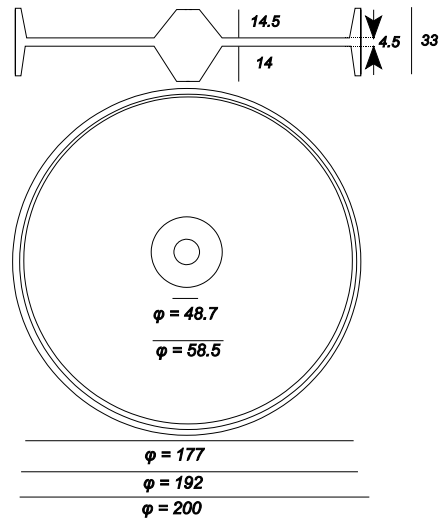


Foto 8: Carcasa exterior del estator del motor MA-55 de Mavilor SA.

En el prototipo Bosch-5, el rotor es de Aluminio, para poder evaluar experimentalmente las prestaciones alcanzables por un rotor similar al Bosch-3, pero con inductores más eficaces y convencionales aunque fuera de su contexto de diseño. Se pretende evaluar el factor de calidad alcanzable en máquinas de inducción de flujo axial con la técnica de construcción clásica. Estos resultados darán una referencia o punto de partida para poder evaluar nuevas máquinas propuestas en las que se pretende aumentar la densidad de corriente en los conductores estáticos o puede que incluso la frecuencia de trabajo.

Este conjunto optimizado electromagnéticamente, ha sido puesto a punto en poco tiempo al aprovechar material construido con anterioridad en el Departament d'Enginyeria Elèctrica de la U.P.C. por R. Bosch.

Dimensiones exteriores de la máquina: 130 x  $\varnothing$ 270. El rotor de aluminio tiene la forma y dimensiones que se indican en el dibujo 4.2. Las protuberancias central y externa hacen la función de la cabeza de bobina rotórica. Adaptan su forma a las cavidades existentes entre las cabezas de bobina estáticas y la carcasa.



Dibujo 4.2: Dimensiones del rotor en mm

Entrehierro: 6.6 mm (4.5 mm de aluminio mas 1.0 mm de holgura mecánica de un lado y 1.1 mm por el otro)

#### 4.1.1.- CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DEL ROTOR

El rotor es de COBRAL. Cobral 2024. Es una aleación de aluminio y cobre (Al Cu Mg<sub>2</sub>), según norma UNE L-3140 38.314.

Se ha construido en estado recocido, que es suficientemente resistente. En caso de tener que girar a mayor velocidad, puede templarse y se dobla así su carga de rotura.

Composición:

Si	Fe	Zn	Ti	Cr	Mn	Mg	Otros	Cu	Al
0.5	0.5	0.2	0.2	0.1	0.3-0.9	1.2-1.8	0.15	3.8-4.9	Resto

Tratamiento de base	Estado metalúrgico	Carga rotura N/mm <sup>2</sup>	Límite elástico N/mm <sup>2</sup>	Alargamiento a 5.65%	Módulo de elasticidad	Cizallamiento N/mm <sup>2</sup>	Dureza Brinell
Recocido	O	200	100	20	7300	-	45
Templado	T4	400	320	19	7300	290	120

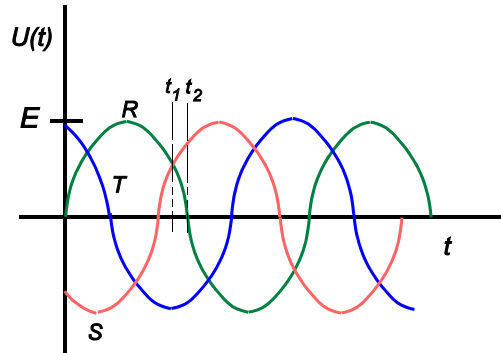
Características:

Peso específico: 2.77 kg/dm<sup>3</sup>  
 Coeficiente de dilatación:  $2.3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$   
 Módulo de elasticidad:  $73.5 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$

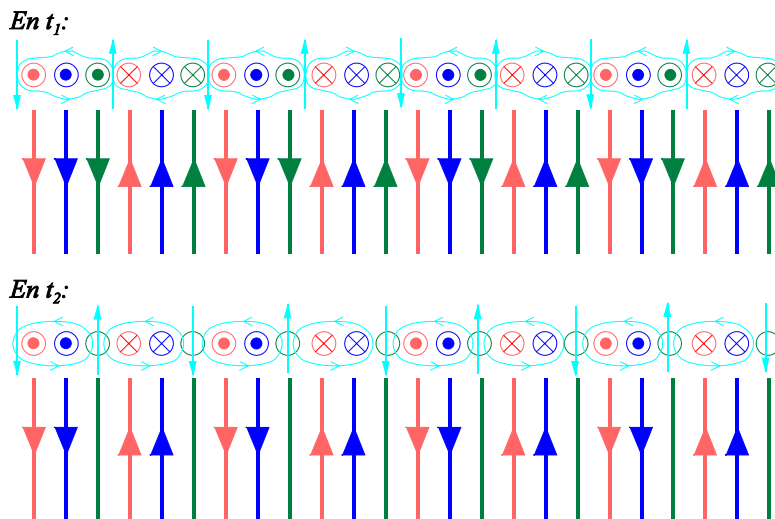
Conductividad térmica:  $0.29 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$   
 Resistividad eléctrica:  $3.4 \text{ } \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$  (a 20°C)  
 Potencial de disolución: -0.69 V

## 4.2.- CIRCUITO MAGNÉTICO

La fuente de campo magnético es una corriente alterna trifásica, y las líneas de campo son guiadas mediante un núcleo de plancha magnética.

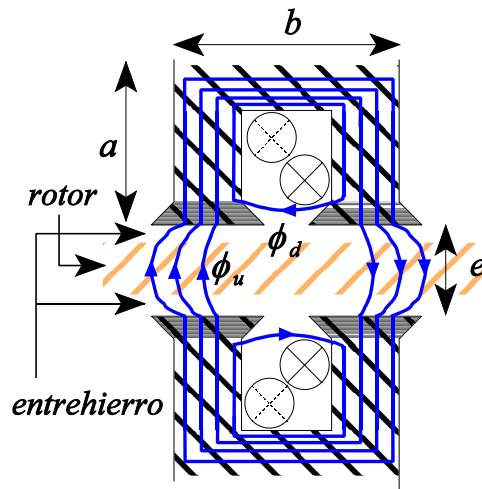


Dibujo 4.3: Tiempos escogidos para comprobar la generación del campo magnético rotatorio.



Dibujo 4.4: Campo magnético axial giratorio creado por una corriente alterna trifásica.

Se comprueba que la conexión con corriente alterna trifásica genera un campo magnético axial giratorio. En el caso que nos ocupa es un campo giratorio en sentido antihorario.



Dibujo 4.5: Líneas de campo magnético generado entre los dos semiestatores. Situación de acoplamiento favorable.

En el dibujo 4.5 se pone de manifiesto el devanado imbricado de doble capa de cada semiestator del prototipo. En cada ranura hay conductores de dos espiras que pertenecen a fases diferentes. Cada espira está compuesta por 6 conductores en paralelo.

Para estudiar el circuito magnético, se utilizará la ley de Maxwell-Ampere:

$$\oint_{n_C} \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_{n_A} \vec{J} \cdot d\vec{A} + \frac{d}{dt} \int_{n_A} \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

En nuestro caso, no existen corrientes de desplazamiento. La ley de Ampere modificada quedará en nuestro caso:

$$\oint_{n_C} \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_{n_A} \vec{J} \cdot d\vec{A}$$

con  $B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$

Se toma como curva C una línea de campo que pasa por los dos semiestatores enlazando las corrientes  $I_A$  e  $I_B$  de cada fase:

$$\oint_{n_C} \vec{H} \cdot d\vec{l} = H_1 \cdot b + H_1 \cdot a + H_2 \cdot e + H_1 \cdot a + H_1 \cdot b + H_1 \cdot a + H_2 \cdot e + H_1 \cdot a$$

$$\oint_{n_C} \vec{H} \cdot d\vec{l} = 2 \cdot H_1 \cdot b + 4 \cdot H_1 \cdot a + 2 \cdot H_2 \cdot e$$

donde  $H_1 = B / (\mu_0 \cdot \mu_r)$  es la inducción en la chapa magnética y  $H_2 = B / \mu_0$  es la inducción en la zona entre ranuras, que incluye aire y rotor metálico.

$$\oint_{n_C} \vec{H} \cdot d\vec{l} = 2 \cdot H_1 \cdot b + 4 \cdot H_1 \cdot a + 2 \cdot H_2 \cdot e = 2 \cdot \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot b + 4 \cdot \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot a + 2 \cdot \frac{B}{\mu_0} \cdot e$$

$$\oint_{n_C} \vec{H} \cdot d\vec{l} = 2 \cdot \frac{B}{\mu_0} \cdot \left( \frac{b}{\mu_r} + 2 \cdot \frac{a}{\mu_r} + e \right) = 2 \cdot \frac{B \cdot e}{\mu_0}$$

Por otro lado,

$$\int_{n_A} \vec{J} \cdot d\vec{A} = 2 \cdot (N_A \cdot I_A + N_B \cdot I_B) = 2 \cdot (N_A \cdot \sqrt{3} \cdot I_A)$$

Donde  $N_A = N_B$ , y son el número de vueltas, por ranura, que tienen las bobinas de las fases A y B respectivamente.

La intensidad nominal que pasa por cada espira es de 24 A en régimen estacionario. Por cada haz de conductores de una fase pasa una intensidad de corriente total magnetizante  $i = 24 \text{ A} / 6 \text{ conductores} = 4 \text{ A}$ . El bobinado consta de 7 vueltas por ranura y fase.

Así,  $\oint_{n_A} \mathcal{H} \cdot d\vec{l} = 2 \cdot (N_A \cdot \sqrt{3} \cdot I_A) = 582 \text{ A vuelta}$

Igualando los dos términos de la ley de Ampere, y tomando el valor  $e = 6.6 \text{ mm}$  se puede estimar teóricamente el valor de B:

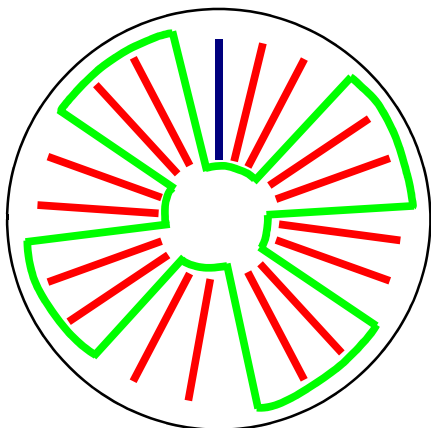
$$\oint_{n_C} \mathcal{H} \cdot d\vec{l} = 2 \cdot \frac{B \cdot e}{\mu_0} \quad \oint_{n_A} \mathcal{H} \cdot d\vec{l} = 2 \cdot (N_A \cdot \sqrt{3} \cdot I_A) = 582 \text{ A vuelta}$$

$$B = \frac{582 \cdot \mu_0}{2 \cdot e} = 55.4 \text{ mT}$$

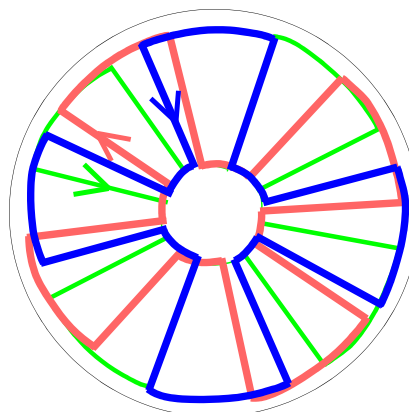
### 4.3.- CIRCUITO ELÉCTRICO

El circuito eléctrico está compuesto por seis bobinas multifilares en devanado imbricado de doble capa. Cada fase alimenta un par de bobinas. La intensidad nominal del prototipo es de 24 A (por fase y semiestátor). La caída de tensión en una de las bobinas es de 32 mV con lo que la resistencia del devanado es 1.3 mΩ. Se puede suponer que la resistencia de los otros devanados es equivalente. Ambos semiestatores están conectados en serie en la disposición original con rotor de SmCo. En nuestro caso (B-5) ambos semiestatores se conectarán en paralelo con lo que la corriente total del conjunto pasará a ser 48 A.

Con los diferentes colores se distinguen las espiras de los devanados de cada semiestátor:



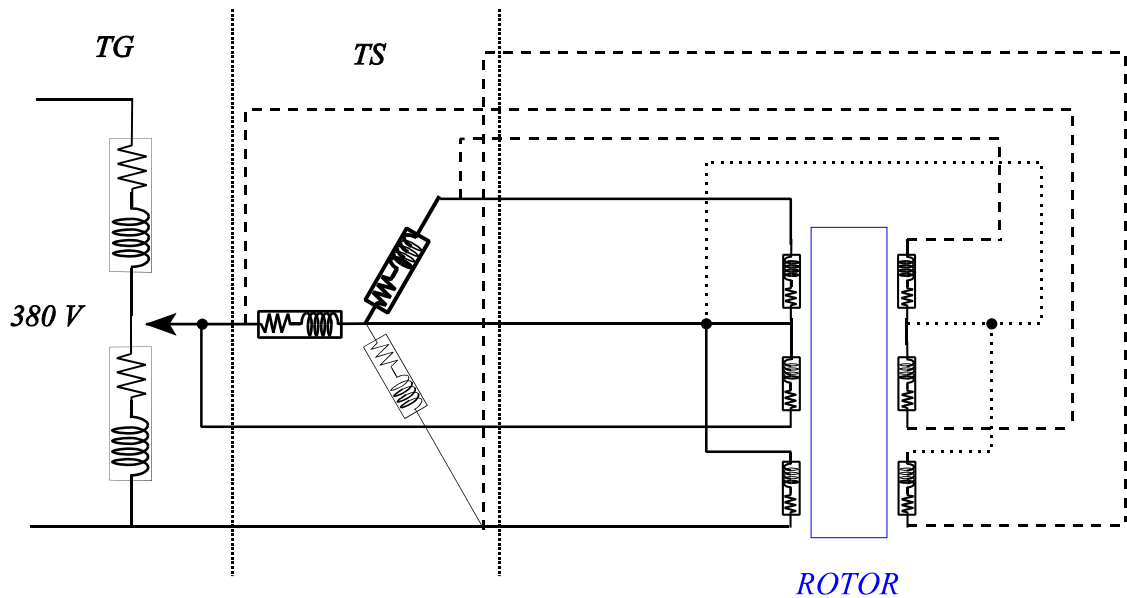
Dibujo 4.6: Forma de una bobina en un semiestator de un motor de flujo axial.



Dibujo 4.7: Esquema del bobinado trifásico de un semiestátor.

#### 4.4.- CIRCUITO EQUIVALENTE

##### *ESQUEMA EQUIVALENTE UNIFILAR DEL PROTOTIPO BOSCH- 5*



Dibujo 4.8: Esquema equivalente unifilar del prototipo Bosch-5 y su fuente de alimentación (TS-TG).

#### 4.5.- PRESTACIONES Y ENSAYOS PROPUESTOS

La máquina resultante se obtiene a partir de los dos semiestátores de un servomotor de baja inercia y flujo axial comercial síncrono con rotor en forma de disco de imanes permanentes. Las prestaciones del generador son bien diferentes si se cambia el rotor original por otro formado por un conductor en cortocircuito, ya que pasa a ser una máquina de inducción en vez de una máquina síncrona con el campo forzado por los imanes rotóricos de SmCo.

En el rotor conductor se inducirán fems que originarán corrientes inducidas. Éstas interaccionarán con las corrientes de los bobinados de los semiestátores creando entre sí fuerzas de atracción, repulsión o ambas a la vez, dando lugar al movimiento relativo del rotor respecto al estátor.

En el prototipo en estudio, se desglosa en tres elementos, dos forman el estator y el tercero es el rotor. Los semiestátores se suponen físicamente idénticos y el rotor es isótropo y sin hierro. Esto último dificulta el establecimiento del campo en el entrehierro pero evita la aparición de fuerzas de reluctancia entre rotor y estátor, que según Bosch [8], pueden limitar la autoelevitación del rotor.

Dadas las dificultades observadas en el presente trabajo se limitará al estudio de los fenómenos asociados al comportamiento tractor de los semiestátores para optimizarlo en lo posible, ya que se trata de geometrías poco convencionales y de entrehierros muy elevados. Por ello se trabajará con el rotor fijado mecánicamente en una posición, mediante un eje y cojinetes que le dejarán libre solo un grado de libertad. En trabajos posteriores, cuando se tenga un sistema tractor mejorado y eficaz, se dejará libre el rotor para que pueda autoelevar. Recuérdese que éste fenómeno se establece por la interacción electromagnética

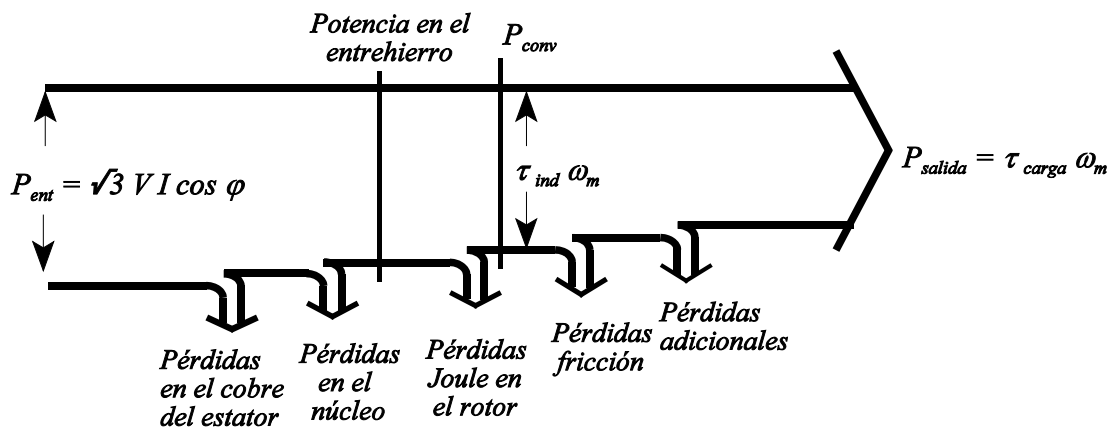
entre las cabezas de bobina estática y rotórica, según [8].

La máquina resultante no tiene por qué garantizar que cada semiestátor influya de igual forma. No se puede asegurar que, mecánicamente, la separación de cada semiestátor al rotor sea la misma, ni tan solo que la precisión utilizada para medir estas distancias sea la adecuada. Si esto ocurre, habrá un semiestátor dominante cuyos efectos serán los más notables. El presente estudio pretende evaluar el orden de magnitud del fenómeno.

La geometría utilizada es poco tratada en la literatura técnica, por lo que se definen sistemas de medida nuevos y se hacen hipótesis de trabajo arriesgadas, pero necesarias para poder tener visión de conjunto y aplicar modelos matemáticos. Para observar el efecto de cada semiestátor, se realizarán ensayos de cada uno por separado. Se realizarán pruebas en vacío, para ver la fem, y a rotor parado.

La corriente de excitación tendrá el valor nominal de 20 A. Hay que tener en cuenta que con los cuatro pares de polos, la velocidad de sincronismo es de 750 rpm. El devanado es de doble capa trifásico y con 44 espiras por ranura y capa. El total de ranuras es de 25, con 24 activas. La ranura vacía es para minimizar el efecto del cosido magnético, recuérdese que el diseño original es con rotor de imán permanente de SmCo. Al montarse ambos semiinductores se han de encarar las ranuras vacías entre sí.

Recordemos según [6] el balance de potencias en un motor de inducción:



Dibujo 4.10: Esquema de balance de potencias de un motor de inducción.

#### 4.5.1.- SEMIINDUCTOR A

Partiendo de los ensayos clásicos y otros definidos *had hoc* se pretende definir los diferentes elementos del circuito equivalente supuesto igual que el de una máquina de inducción. El inductor está conectado en estrella. Los bajos valores de par y las dificultades de instrumentación hacen que se defina un solo punto en cada ensayo, realizado a la corriente nominal de 20 A.

La holgura mecánica o distancia entre el rotor de aluminio y el semiestátor A es de 1.2 mm.

##### 4.5.1.1.- Ensayo en vacío

Básicamente nos indica los valores magnetizantes en máquinas de elevado rendimiento, al despreciar la



potencia transferida al rotor. En nuestro caso, con rendimientos muy alejados de valores comerciales, esto no es cierto con rigor, ya que como se verá, la fricción de los cojinetes es del mismo orden de magnitud que la potencia útil en el punto definido como nominal.

No obstante es una prueba necesaria para justificar el rediseño de los semiestátores a la vista de los circuitos equivalentes.

No se puede alimentar a la tensión de red, que es la nominal, (220 V) debido a que no existe el flujo debido a los imanes de SmCo. Por tanto el campo magnético creado por las bobinas, es un orden de magnitud inferior al creado por los imanes. La FCEM será diez veces inferior aproximadamente. La única magnitud que nos puede guiar es la corriente por bobina. Tomaremos un valor de 20 A, muy similar a la del motor original, así sabemos que el prototipo resiste térmicamente los ensayos, mientras no superemos este valor.

Considerando el ensayo, con las bobinas conectadas en estrella, tenemos:

- Corriente, eficaz, absorbida por cada bobina a 50 Hz: 20 A.
- Tensión entre fases: 2.6 V
- Velocidad de rotación: 500 rpm
- Potencia absorbida de red (medido con vatímetro y dos trafos de medida de corriente, clase de precisión 3%): 50 W
- Par de rozamiento del rotor  $\Gamma$  ( $F = 2.39$  kg,  $r = 7$  mm): 0.164 Nm
- Resistencia de cada devanado (medida con puente Thompson 0.2% de error): 1.4 m $\Omega$

Tabla de valores para el Estator “A”:

cos $\varphi$	VA	V	I	n	W	Var
0.56	89	2.6	20	500	50	74

#### 4.5.1.2.- Tensión transferida al semiestátor opuesto

Éste es un ensayo atípico que sólo se puede realizar con la geometría de éste motor y no en los convencionales. Consiste en arrastrar el rotor desde un semiestátor, evidentemente con bajo rendimiento. Si se mide la inducción inducida en el otro semiestátor, puede tenerse una idea del campo magnético que le alcanza. El rotor, al estar en medio del entrehierro, por lo menos “ve” o “recibe” el doble de campo magnético para inducir sus corrientes.

La importancia de este ensayo se apreció en cálculos posteriores, cuando ya se había desmontado el equipo experimental, por causas ajenas a este trabajo. Para la labor programada, no era imprescindible su estudio detallado, ya que la geometría de estos semiestátores no es la mejor, como se verá, y por tanto no es necesario un estudio exhaustivo, aunque si se recomienda analizarlo con mayor detalle en trabajos posteriores.

Cuando se tenga la geometría de semiestátores adecuada, este ensayo permitirá evaluar la variación de acoplamiento entre rotor y cada semiestátor, en función de su posición en el entrehierro.

Lectura de tensión residual inducida en el semiestátor opuesto “B”:

- Si el rotor se frena a 300 rpm,  $V = 0.42$  V

- Si el rotor se bloquea,  $V = 0.38 \text{ V}$

#### 4.5.1.3.- Balance de energías

Es calculado a partir de los datos anteriores.

Par de rozamiento del rotor:  $F = 2.39 \text{ kg}$ ,  $r = 7 \text{ mm}$ ,  $\Gamma = 0.164 \text{ Nm}$   
 Resistencia de cada devanado medida con puente Thompson:  $1.4 \text{ m}\Omega$ .

Potencia disipada por el rozamiento:

$$* P_{\text{fricción}} = \Gamma \omega = 0.164 \cdot 50 \cdot \pi / 3 = 8.6 \text{ W}$$

$$* P_{\text{entrada}} = 50 \text{ W} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \varphi; \quad \cos \varphi = \frac{50}{\sqrt{3} \cdot 2.6 \cdot 20} = 0.56; \quad \varphi = \arccos(0.56) = 56^\circ$$

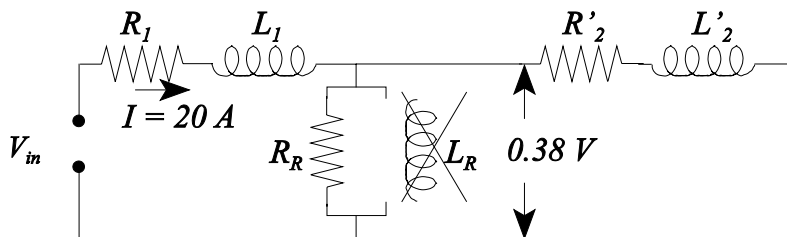
$$* P_{\text{Cu estator}} = 3 \cdot R \cdot I^2 = 3 \cdot 90 \cdot 10^{-6} \cdot 20^2 = 0.1 \text{ W}$$

$$* P_{\text{salida}} = P_{\text{útil}} = \Gamma \omega = 0.17 \cdot 50 \cdot \pi / 3 = 8.9 \text{ W}$$

Balance de potencias:

$$50 = 0.1 + P_{\text{núcleo}} + P_{\text{Joule Rotor}} + 8.6 + 8.9$$

Para hallar el valor de  $P_{\text{Joule Rotor}}$ :



Dibujo 4.11: Esquema equivalente con circuito bloqueado. Semiestátor A.

Se parte del dato que, a rotor parado, la tensión en el segundo semiestátor es de  $0.38 \text{ V}$ . En un motor de inducción si el rotor se bloquea, toda la potencia se disipa en el rotor, ya que las pérdidas joule del estátor pueden despreciarse, las pérdidas en el hierro también al trabajar a tensiones mucho más bajas. Evidentemente no hay potencia transmitida al eje. Dado que ambos semiestátors son iguales, no existen problemas de relaciones de transformación ya que todos los valores se consideran reducidos al primario. Así, con las reservas de todo cálculo aproximado, podemos indicar que:

$$R_R = V / I = 0.38 / 20 = 19 \text{ m}\Omega.$$

$$* P_{\text{joule Rotor}} = I^2 \cdot R_R = 20^2 \cdot 19 \text{ m}\Omega = 7.2 \text{ W}$$

de lo anterior, volviendo a plantear la ecuación de vacío, se deduce:

$$* P_{\text{núcleo}} = 50 - 0.1 - 8.6 - 8.9 - 7.2 = 25.2 \text{ W}$$

Cabe señalar que este valor de  $P_{\text{núcleo}}$  es del orden de magnitud del medido en vacío con rotor de SmCo a estas frecuencias y órdenes de campo (29 W) según el catálogo del propio fabricante, Mavilor Motors S.A.

\* Potencia electromagnética transferida al secundario:

$$P_a = P_{\text{entrada}} - P_{\text{Cu estator}} - P_{\text{núcleo}} = 50 - 0.1 - 25.2 = 24.7 \text{ W}$$

\* Deslizamiento:

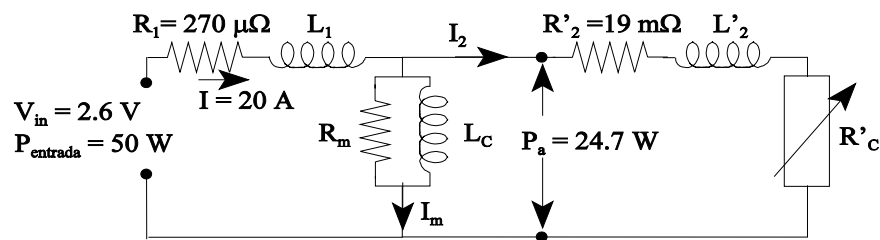
$$s_1 = \frac{750 - 500}{750} = 33.3\%$$

$$\text{El rendimiento es: } \eta_A = \frac{8.9}{50} = 0.178 = 17.8\%$$

#### 4.5.1.4.- Circuito equivalente aproximado

Es posible que no sea de aplicación el modelo de circuito equivalente en  $\pi$  de la máquina de inducción clásica, pero se adoptará en este trabajo para centrar y analizar parámetros, con las reservas oportunas, ya que no estamos frente a una geometría muy referenciada en la literatura convencional.

En el ensayo de condiciones nominales se tiene  $s = 33.3\%$



Dibujo 4.12: Valores de los componentes del circuito equivalente calculados a partir de los datos experimentales

De las medidas de resistencias de cada bobina trifásica del estator se puede obtener:

$$R_1 = 3 \cdot R = 3 \cdot 90 \mu\Omega = 270 \mu\Omega$$

A partir del deslizamiento, se calcula la resistencia equivalente del trabajo mecánico:

$$R'_c = R_2 \cdot (1-s)/s = 38 \text{ m}\Omega$$

Desgraciadamente, causas ajenas a la investigación impidieron realizar medidas de reactiva en vacío y a rotor parado. Esta indeterminación impide terminar de definir el circuito equivalente.

Se decidió que esta determinación, difícil desde el punto de vista instrumental y temporal, quedaba fuera del alcance de la tesis, ya que se disponía de datos suficientes para recurrir a otra geometría estatórica.

Para confirmar esta recomendación, se repitieron medidas similares a las de este apartado con otras configuraciones, como se indica al final de la tesis en el anexo III.

**4.5.2.- SEMIINDUCTOR B**

Con el semiinductor B, las bobinas también se encuentran conectadas en estrella. Los bajos valores de par y las dificultades de instrumentación hacen que se defina un solo punto de ensayo, realizado a la corriente nominal de 20 A.

La holgura mecánica o distancia entre el rotor de aluminio y el semiestátor B es de 1.1 mm.

**4.5.2.1.- Ensayo en vacío**

Considerando el ensayo, con las bobinas conectadas en estrella, tenemos:

- Corriente, eficaz, absorbida por cada bobina a 50 Hz: 20 A.
- Tensión entre fases: 4.4 V
- Velocidad de rotación: 520 rpm
- Potencia absorbida de red (medido con vatímetro y dos trafos de medida de corriente, clase de precisión 3%): 40 W
- Par de rozamiento del rotor  $\Gamma$  ( $F = 2.39$  kg,  $r = 7$  mm): 0.164 Nm
- Resistencia de cada devanado (medida con puente Thompson 0.2% de error): 0.18 m $\Omega$

Estator “B”:

cos $\phi$	VA	V	I	n	W	Var
0.26	153	4.4	20	520	40	148

**4.5.2.2.- Tensión transferida al semiestátor opuesto**

Lectura de tensión residual inducida en el semiestátor opuesto “A”:

- Si el rotor se frena a 300 rpm,  $V = 0.37$  V
- Si el rotor se bloquea,  $V = 0.28$  V

**4.5.2.3.- Balance de energías**

Es calculado a partir de los datos anteriores.

Par de rozamiento del rotor:  $F = 2.39$  kg,  $r = 7$  mm,  $\Gamma = 0.164$  Nm  
 Resistencia de los devanados: 0.18 m $\Omega$ .

Potencia disipada por el rozamiento:

\*  $P_{\text{fricción}} = \Gamma \omega = 0.164 \cdot 52 \cdot \pi / 3 = 8.9$  W

\*  $P_{\text{entrada}} = 40$  W =  $\sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \phi$ ;  $\cos \phi = \frac{40}{\sqrt{3} \cdot 4.4 \cdot 20} = 0.26$ ;  $\phi = \arccos(0.26) = 74.8^\circ$

\*  $P_{\text{Cu estator}} = 3 \cdot R \cdot I^2 = 3 \cdot 90 \cdot 10^{-6} \cdot 20^2 = 0.1$  W

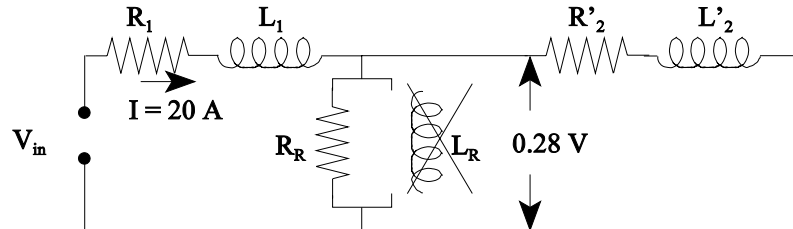
CARACTERIZACIÓN DE UN MOTOR EXISTENTE (Bosch-5)

$$* P_{\text{salida}} = P_{\text{util}} = \Gamma A \omega \cdot 0.17 \cdot 52 \cdot \pi / 3 = 9.3 \text{ W}$$

Balance de potencias:

$$40 = 0.1 + P_{\text{nucleo}} + P_{\text{Joule Rotor}} + 8.9 + 9.3$$

Para hallar la el valor de  $P_{\text{Joule Rotor}}$ :



Dibujo 4.13: Esquema equivalente con circuito bloqueado. Semiestátor B.

Se parte del dato que a rotor parado, la tensión en el segundo semiestator es de 0.28 V. En un motor de inducción si el rotor se bloquea, toda la potencia se disipa en el rotor:

$$R_R = V / I = 0.28 / 20 = 14 \text{ m}\Omega.$$

$$* P_{\text{joule Rotor}} = I^2 \cdot R_R = 20^2 \cdot 14 \text{ m}\Omega = 5.6 \text{ W}$$

a partir del resultado anterior y planteando de nuevo la ecuación de vacío se deduce:

$$* P_{\text{nucleo}} = 40 - 0.1 - 8.9 - 9.3 - 5.6 = 16.1 \text{ W}$$

\* Potencia electromagnética transferida al secundario:

$$P_a = P_{\text{entrada}} - P_{\text{Cu estator}} - P_{\text{nucleo}} = 40 - 0.1 - 16.1 = 23.8 \text{ W}$$

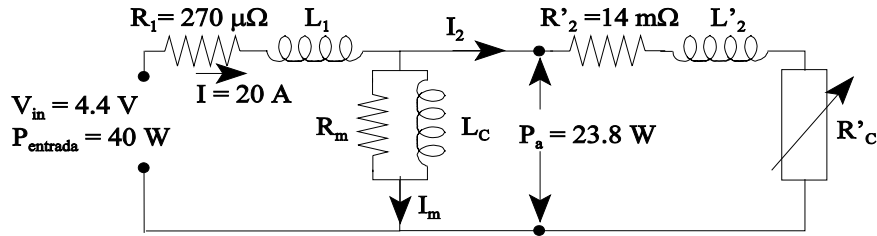
\* Deslizamiento:

$$s_2 = \frac{750 - 520}{750} = 30.6\%$$

El rendimiento es:  $\eta_B = \frac{9.3}{40} = 0.233 = 23.3\%$

**4.5.2.4.- Circuito equivalente aproximado**

En el ensayo de condiciones nominales se tiene  $s = 30.6\%$



Dibujó 4.14: Valores de los componentes del circuito equivalente calculados a partir de los datos experimentales

El valor de  $R_1$  se calcula de forma idéntica al apartado 4.5.1.4:

$$R_1 = 3 \cdot R = 3 \cdot 90\mu\Omega = 270 \mu\Omega$$

Y, a partir del deslizamiento, se calcula la resistencia equivalente del trabajo mecánico:

$$R'_c = R_2 \cdot (1-s)/s = 31.8 \text{ m}\Omega$$

**4.5.3.- CONCLUSIONES DE LOS APARTADOS 4.5.1 y 4.5.2.**

Para poder comparar los efectos de la magnetización singular desde cada uno de los semiestátors, se juntan los resultados en la siguiente tabla, que permitirá en un futuro detectar relaciones que aún no son evidentes

	A	B	Diferencia A/B (%)	P/Pi (%)	
				A	B
Potencia absorbida por cada semiestátor ( $P_i$ )	50 W	40 W	20 (-) <sup>1</sup>	100	100
Potencia transferida al secundario ( $P_a$ )	24.7 W	23.8 W	4 (-)	49.4	59.5
Pérdidas por efecto Joule en el primario ( $P_{Cu1}$ )	0.1 W	0.1 W	0	0	0
Pérdidas por efecto Joule en el secundario ( $P_{Cu2}$ )	7.2 W	5.6 W	22 (-)	14.4	14
Pérdidas en el hierro ( $P_{Fe}$ )	25.2 W	16.1 W	36 (-)	50.4	40
Pérdidas mecánicas ( $P_{Mec}$ )	8.6 W	8.6 W	0	17.2	21.5
Potencia útil ( $P_U$ )	8.9 W	9.3 W	4 (+)	17.8	23.3
Potencia aparente ( $P_a$ )	89 VA	148 VA	60 (+)	-	-
Factor de potencia ( $\cos \varphi$ )	0.55	0.26	53 (-)	-	-
Deslizamiento (s)	33.3 %	30.6 %	8 (-)	-	-
Rendimiento ( $\eta$ )	17.8 %	23.3 %	31 (+)	-	-
Separación entre el semiestátor y el rotor ( $\delta$ )	1.2 mm	1.1 mm	8 (-)	-	-
Flujo magnético residual ( $\Phi_R$ )	1.7 mWb	1.3 mWb	24 (-)	-	-

De las medidas obtenidas y resultados hallados por cálculo teóricos pueden deducirse relaciones importantes:

- La diferente distancia de cada semiestátor al rotor, con diferencias de un 8 %, aunque se trate de 0.1 mm, origina diferencias del mismo orden de magnitud en el deslizamiento (s) y potencia útil ( $P_U$ ). Esto es lógico ya que al acercarse rotor y estátor, mejora su acoplamiento magnético, y con ello sus prestaciones mecánicas. En el rotor se inducen corrientes que apantallan los efectos del estátor. En cada caso el apantallamiento tiene un efecto diferente. Se puede suponer que apantallará más cuanto más próximo se encuentre al semiestátor activo.
- También queda demostrado por la mejora ostensible de rendimiento. Ello no es muy representativo en aspecto cuantitativo, ya que las pérdidas en el cobre rotórico y en el hierro no se han podido medir con tanta exactitud.
- La parte inductiva que no se ha podido medir con precisión se puede afirmar que es crítica e

<sup>1</sup> El signo indica si el valor del semiestátor B es inferior (-) o mayor (+) al del semiestátor A.

influida por varios parámetros: acoplamiento rotor semiestátor, flujo de dispersión de las ranuras, reacción de inducido, entrehierro muy elevado...

- Puede afirmarse que el estátor diseñado para estar excitado por imanes de SmCo, no es adecuado para tener rotor de inducción. El factor de potencia es muy bajo y produce demasiadas pérdidas en el hierro.

- Los resultados indican que el campo generado por el estator es del orden de 1/30 del original (máquina excitada de SmCo):

$$\text{Semiestator } A : \frac{2.6 \text{ V}}{110 \text{ V}} , \frac{1 \text{ V}}{42.3 \text{ V}} \quad ; \quad \text{Semiestator } B : \frac{4.4 \text{ V}}{110 \text{ V}} , \frac{1 \text{ V}}{25 \text{ V}}$$

Ambos semiestátors son idénticos y las diferencias observadas obedecen a la diferente distancia de cada semiestator respecto al rotor.

- El estator A está más alejado del rotor que el B. A igualdad de corriente, hace girar al rotor más lento 500 rpm frente a las 520 rpm en el B.

- La reacción de inducido a rotor parado, que es el único punto comparable, es menor ya que provoca una caída de tensión de 0.38 V frente a los 0.28 V del B a igualdad de corriente. Esto hace que, caso de estar conectados en paralelo a la misma fuente de corriente, el estator B repelería más fuertemente al rotor al circular por éste más corriente y estar más cerca. Esta fuerza no se ha podido medir aquí porque era absorbida por los cojinetes.

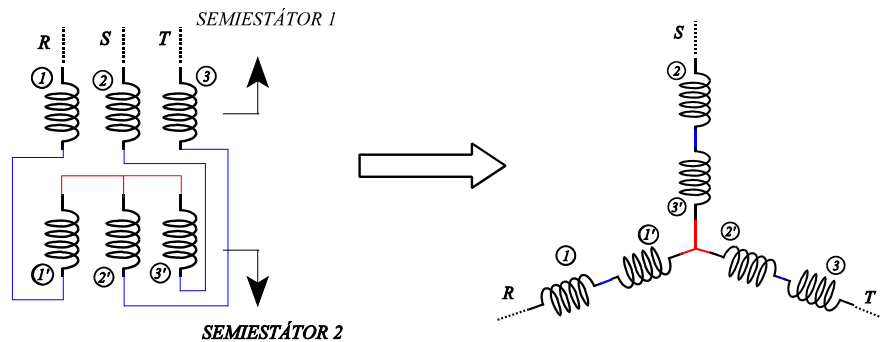
- Al acercarse el rotor al semiestátor, crece exageradamente la inductancia del conjunto. Parece como si el campo magnético fuese repelido por el rotor conductor y se viera obligado a entrar en las ranuras como flujo de dispersión. Este fenómeno se ha de estudiar con más detalle en un futuro, ya que podría tratarse de un incremento exagerado de la inductancia rotórica  $L_2$ . De esta forma se podría explicar el, aparentemente paradójico, fenómeno de que al acercarse el rotor disminuye mucho el factor de potencia. Habría que rediseñar los estátors haciendo más pequeñas las ranuras, para disminuir la inductancia del estator  $L_1$ , esto en el límite conduciría a eliminar los dientes de ranura y acercarnos a la capa de corriente teórica. Esto solo es posible si se aumenta la densidad de corriente de los conductores estatóricos, refrigerándolos de forma forzada, o empleando superconductores.

- La gran diferencia existente entre la resistencia del estátor  $R_1$  y la resistencia rotórica reducida al primario  $R'_2$  indica un diseño poco afortunado a esta frecuencia, como era de esperar. No se descarta la necesidad de un estudio teórico más detallado ya que las medidas y cálculos se han hecho de una forma un tanto grosera.



#### 4.5.4.- CONEXIÓN SIMULTÁNEA DE LOS DOS SEMIESTÁTORES

Una vez ensayados los semiestatores por separado, se va a probar el prototipo por completo; los dos semiestatores con el rotor metálico con forma de disco. De las posibles conexiones entre los semiestatores (en el anexo III se presentan resultados de diferentes conexiones) se toma aquella que da mejor rendimiento. La conexión en cuestión es en estrella. Se une cada bobina de un semiestator a otra bobina del otro semiestator y se conectan en estrella:



Dibujo 4.15: Conexión de las bobinas de los semiestatores en estrella.

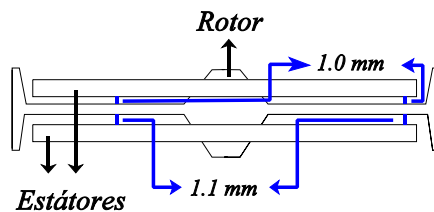
##### 4.5.4.1.- Ensayo en vacío. Curvas características

En el caso en estudio el rotor es de metal que, como material no ferromagnético, no facilita que las líneas de campo magnético se cierren. A efectos de flujo, se puede entender que el espacio entre semiestatores es todo entrehierro, un entrehierro desmesurado.

Hay dos maneras de reducir el entrehierro:

- 1.- Reducir la separación entre los semiestatores y el rotor. Se tiende a que el entrehierro tuviese el tamaño del espesor del rotor.
- 2.- Reducir el espesor del rotor. Esta opción se puede valorar, ya que en el rotor se van a inducir corrientes no demasiado elevadas y no se calentaría. Ahora bien, es la opción más delicada, ya que existen luego problemas de equilibrado del rotor que no se desean.

Se escoge la opción 1, quedando las dimensiones siguientes del motor:



Dibujo 4.16: dimensiones finales del rotor

Después de reducir el entrehierro, y con la conexión entre semiestatores en estrella tal y como se indica en la figura 4.15, se realizan ensayos y diferentes puntos de trabajo.

## CARACTERIZACIÓN DE UN MOTOR EXISTENTE (Bosch-5)

Se obtuvo la siguiente tabla (a 50 Hz):

n (rpm)	W (W)	Var (VA)	P <sub>aparente</sub> (VA)	V (V)	I (A)	s (%)	cos $\eta$
663	60	90	110	5.6	11.2	11.6	0.555
677	84	112	140	6.8	11.8	9.7	0.60
687	120	140	184	8.7	12.2	8.4	0.660
693	142	170	220	10.0	12.8	7.6	0.645
693	190	230	300	13.2	13.1	7.6	0.64

Los valores de tensión e intensidad de las columnas quinta y sexta son las tensiones entre fases en la entrada del prototipo y la intensidad que lo alimenta.

Se puede observar que la intensidad del prototipo no llegó al valor nominal (24 A). La causa es la fuente utilizada, que no permite suministrar una intensidad superior a los 13 amperios. Para solventar este contratiempo, se utiliza un transformador trifásico del laboratorio de máquinas eléctricas de características:

Potencia: 7.5 KVA

Tensiones: 380 estrella / 220 triángulo

Intensidades: 11.45 / 19,7

Al introducir en la alimentación del prototipo este transformador, se abre la posibilidad de aumentar la intensidad de alimentación por ello se repite el ensayo obteniéndose la siguiente tabla (a 50 Hz):

n (rpm)	W (W)	Var (VA)	P <sub>aparente</sub> (VA)	V (V)	I (A)	s (%)	cos $\eta$
580	34	34	48	3.1	9.0	22.7	0.707
645	60	72	95	4.4	12.5	14	0.633
665	78	120	145	5.4	15.5	11	0.543
684	150	230	274	7.2	22.0	8.8	0.555
692	260	286	385	8.9	25.0	7.7	0.669
700	510	510	717	12.0	34.5	6.7	0.707

Donde se puede comprobar que los resultados no son muy diferentes a los que se muestran en el anexo III.

### 4.5.4.2.- Ensayo de frenado. Curvas características

El ensayo se realiza con la ayuda de un freno de polvo magnético (Par de freno variable por corriente de excitación).

Características del freno: Tensión (continua): variable entre 0 y 24 V

Potencia: 200 W

Par producido: entre 0 y 12 Nm

Intensidad máxima: 0.51 A

4.5.4.2.1.- Curva par máximo-intensidad

El motor se acopla al freno mediante una junta CARDAN y en un dinamómetro (0-2.0 kg) se toman los valores de las fuerzas producidas

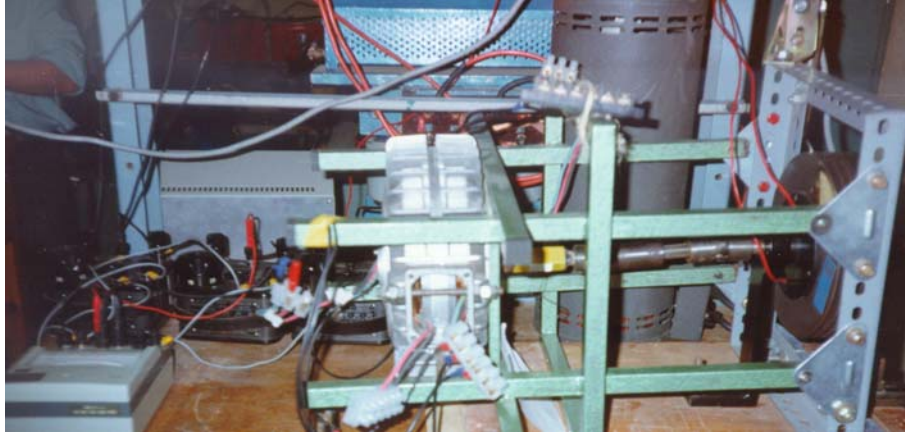


Foto 9: Estatores Mavilor sobre el soporte de trabajo. Se observa la junta cardan y, a la derecha, el freno de polvo magnético.

La metodología fue la siguiente:

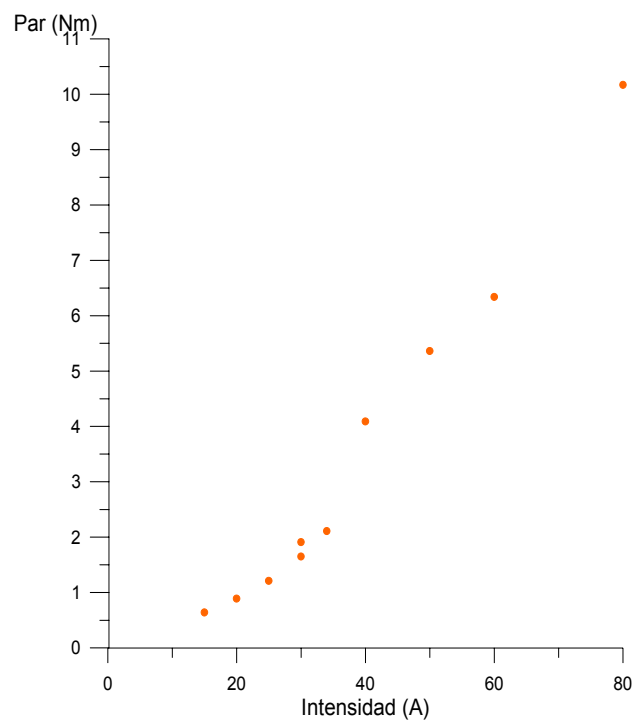
En el freno se aplica una diferencia de potencial, según el valor de ésta el freno provocará un rozamiento entorpeciendo el giro del motor como si intentase girar solidariamente con el rotor. El freno se encuentra sujeto mediante el dinamómetro produciendo una medida de fuerza en él. Si se aumenta la corriente de entrada en el freno, éste produce un rozamiento más elevado, como si quisiera adherirse al eje del motor, produciendo una lectura en el dinamómetro más elevada, hasta que finalmente, el freno consigue adherirse totalmente al rotor y detenerlo.

Inicialmente se mide el rozamiento residual:

Rozamiento del motor:	$F = 2.39 \text{ kg}$ ,	$r = 7 \text{ mm}$	$\Gamma = 0.164 \text{ Nm}$
Rozamiento del freno:	$F = 0.9 \text{ kg}$ ,	$r = 22 \text{ mm}$	$\Gamma = 0.194 \text{ Nm}$

Tabla (a 50 Hz):

V (V)	I (A)	W (W)	Var (VA)	cos $\phi$	Fuerza (kg)	r (m)	$\Gamma$ (Nm)	$\Gamma_{TOTAL}$ (Nm)
4.7	15	35	50	0.57	0.16	0.18	0.28	0.64
6.1	20	70	75	0.682	0.3	0.18	0.53	0.89
7.5	25	110	110	0.71	0.48	0.18	0.85	1.21
9.0	30	162	158	0.72	0.73	0.18	1.29	1.65
9.7	30	200	210	0.69	0.88	0.18	1.55	1.91
10.4	34	210	195	0.73	1.0	0.18	1.77	2.11
12.0	40	350	400	0.66	3.8	0.10	3.73	4.09
14.0	50	550	600	0.68	5.1	0.10	5.00	5.36
18.0	60	725	850	0.65	6.1	0.10	5.98	6.34
24.0	80	1300	1600	0.63	10.0	0.10	9.81	10.17



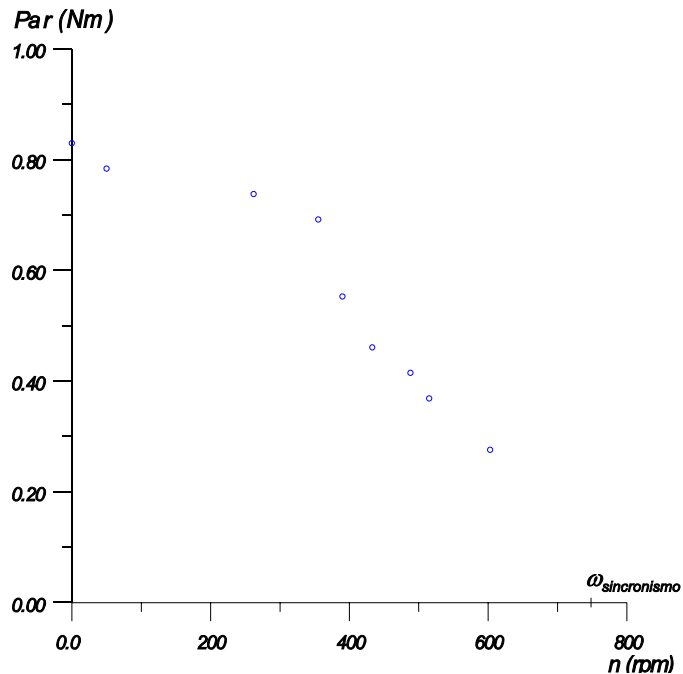
Gráfica 4.1: Par- Intensidad

4.5.4.2.2.- Curva par-velocidad

Tomando como valores nominales de la máquina  $I_N = 24$  A y  $V_N = 8$  V. Se realiza la curva par velocidad con un brazo de palanca de 5.0 cm. Las lecturas obtenidas a la frecuencia de 50 Hz son:

n (rpm)	F (kg)	$\Gamma$ (Nm)	$P_{\text{útil}}$ (W)	$\eta$ (%)	S (%)
603	0.6	0.276	17.4	6.3	19.6
515	0.8	0.369	19.9	7.2	31.3
488	0.9	0.415	21.2	7.7	34.9
433	1.0	0.461	20.9	7.5	42.3
390	1.2	0.553	22.6	8.2	48.0
355	1.5	0.692	25.7	9.3	52.7
262	1.6	0.738	20.2	7.3	65.3
50	1.7	0.784	4.1	1.5	93.3
0	1.8	0.830	0	0	100

La velocidad de sincronismo de un motor de 4 pares polos a una frecuencia de 50 Hz es de 750 rpm. Esta tendencia se observa en la gráfica. Con los datos de velocidad de giro, par y la velocidad de sincronismo, se han podido obtener los datos de rendimiento y deslizamiento dados en las dos últimas columnas de la tabla.



Gráfica 4.2: Par-velocidad

Esta última curva es la típica de un rotor muy resistivo [6]

**4.5.5.- ENSAYO A FRECUENCIA VARIABLE. ENSAYOS A 100 Hz, 125 Hz, 150 Hz y 200 Hz**

Una de las pruebas que más interés había por realizar era comprobar el comportamiento del Bosch-5 frente a una suave variación de la frecuencia de la fuente [24].

Para ello se utilizó un grupo motor del Departament d'Enginyeria Elèctrica que suministra una señal eléctrica con frecuencias comprendidas entre 50 Hz y 225 Hz. El grupo se controla desde una bancada de trabajo permitiendo la regulación de frecuencia de forma suficientemente estable.



Foto 10: Grupo motor utilizado como fuente de señal eléctrica de frecuencia variable.



Foto 11: Bancada de control del grupo motor de frecuencia variable.

Las frecuencias a las que se hicieron las pruebas fueron 100 Hz, 125 Hz, 150 Hz y 200 Hz.

Los datos medidos experimentalmente son la tensión, intensidad, velocidad de giro y las potencias activa y reactiva. A partir de éstos, se calculan la potencia aparente, el factor de potencia y el deslizamiento. Los resultados se muestran a continuación:

- Tabla I (f = 100 Hz,  $\omega_s = 1500$  rpm):

V (V)	I (A)	n (rpm)	cos $\phi$	VA (W)	S (%)
4	6.3	180	0	43.6	88.0
5	8.5	350	0	73.6	76.7
5.8	10.0	750	0	100.5	50.0
7.0	11.2	1000	0.6	135.8	43.3
8.2	12.4	1180	0.61	176.1	21.3
9.0	13.6	1230	0.6	212.0	18.0
10.0	14.8	1270	0.66	256.3	15.3
11	17.2	1310	0.71	327.7	12.7
12	19.0	1320	0.67	394.9	12.0
13	20.5	1330	0.58	461.6	11.3

- Tabla II (f = 125 Hz,  $\omega_s = 1875$  rpm):

V (V)	I (A)	n (rpm)	cos $\phi$	VA (W)	S (%)
5	8.4	270	0.48	72.7	85.6
7	9.6	1200	0.55	116.4	36.0
8	10.8	1400	0.71	149.6	25.3
9.3	12.2	1500	0.71	196.5	20.0
12.0	16.0	1600	0.78	332.6	14.7
14.5	19.5	1640	0.79	489.7	12.5
16.0	22.0	1650	0.72	609.7	12.0
18.0	24.5	1670	0.62	763.8	11.0
22.0	30.0	1680	0.55	1143.2	10.6

CARACTERIZACIÓN DE UN MOTOR EXISTENTE (Bosch-5)

Tabla III ( $f = 150 \text{ Hz}$ ,  $\omega_s = 2250 \text{ rpm}$ ):

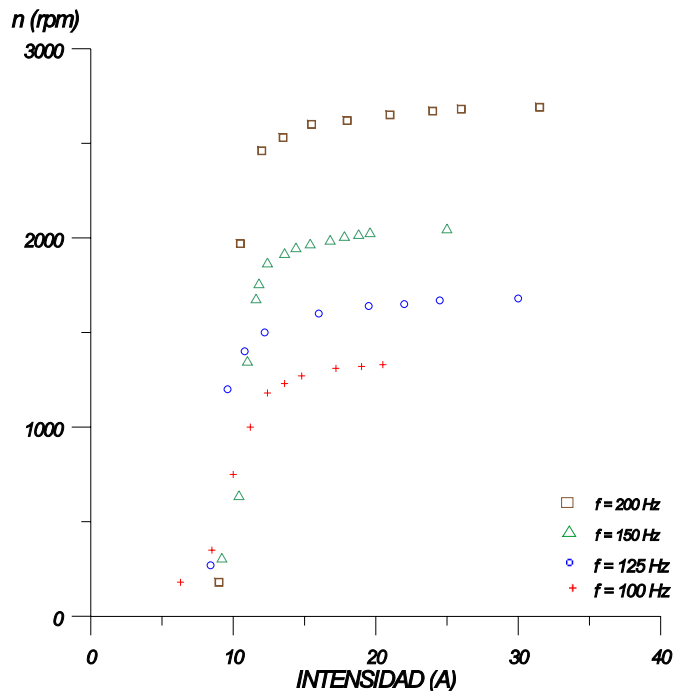
V (V)	I (A)	n (rpm)	$\cos \varphi$	VA (W)	S (%)
2.4	2.4	0	-	9.97	100
4.0	6.0	66	0.24	41.6	97.1
5.0	8.0	140	0.89	69.3	93.8
6.0	9.2	310	0.62	95.6	86.2
7.0	10.4	640	0.55	126.1	71.6
8.2	11.0	1350	0.55	156.2	40.0
9.4	11.6	1680	0.66	188.9	25.3
10.0	11.8	1760	0.71	204.4	21.8
11.0	12.4	1870	0.77	236.3	16.9
12.0	13.6	1920	0.76	282.7	14.7
13.0	14.4	1950	0.79	324.2	13.3
14.0	15.4	1970	0.8	373.4	12.4
15.0	16.8	1990	0.82	436.5	11.6
16.0	17.8	2010	0.81	493.3	10.7
17.0	18.8	2020	0.84	553.6	10.2
18.0	19.6	2030	0.85	611.1	9.8
22.5	25.0	2050	0.68	974.3	8.9

Tabla IV ( $f = 200 \text{ Hz}$ ,  $\omega_s = 3000 \text{ rpm}$ ):

V (V)	I (A)	n (rpm)	$\cos \varphi$	VA (W)	S (%)
4.0	5.0	0	-	20.0	100
7.0	9.0	180	0.71	109.1	94.0
10.0	10.5	1970	0.71	181.9	34.3
13.0	12.0	2460	0.79	270.2	18.0
15.0	13.5	2530	0.83	350.7	15.7
17.5	15.5	2600	0.85	469.8	13.3
20.5	18.0	2620	0.87	639.1	12.7
24.0	21.0	2650	0.87	873.0	11.7
27.5	24.0	2670	0.87	1143	11.0
30.0	26.0	2680	0.88	1351	10.7
36.0	31.5	2690	0.72	1964	10.3

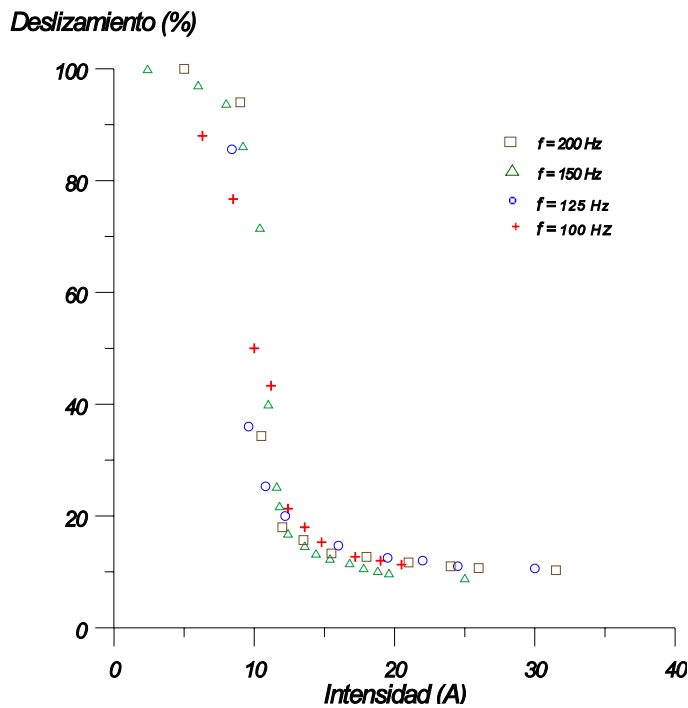
Las gráficas siguientes son la síntesis de los resultados tabulados anteriormente.

4.5.5.1.- Gráfica n-I



Gráfica 4.3: velocidad-intensidad a diferentes frecuencias.

4.5.5.2.- Gráfica s-I



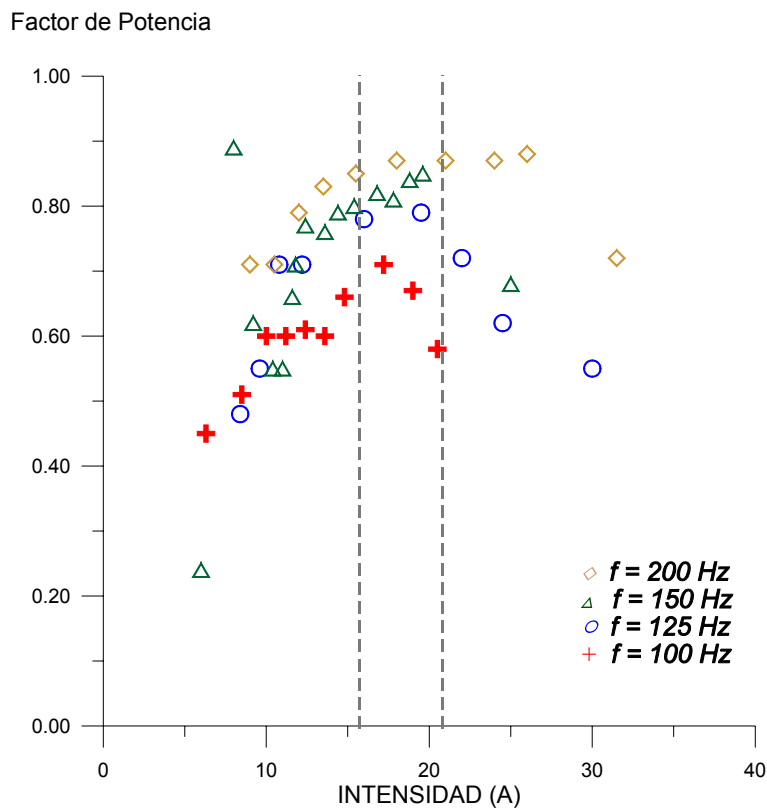
Gráfica 4.4: Deslizamiento-Intensidad. El comportamiento es independiente de la frecuencia.



En ésta última gráfica se observan dos codos en la curva. El más interesante es el codo inferior, ya que indica la intensidad a partir de la cual el deslizamiento empieza a tener valores razonables.

Este comportamiento es muy similar, pero invertido, al de una curva de saturación de un transformador de corriente de protección. Podríamos suponer que esa intensidad es la necesaria para que se originen las intensidades inducidas suficientemente elevadas en el rotor conductor, como para que los efectos de repulsión entre corrientes den lugar al desplazamiento del rotor. Paralelamente, se puede suponer que los efectos de levitación entran en juego entre estos dos codos. Para ello habría que dejar flotar al rotor para poder observar las fuerzas de levitación que no es el alcance de este prototipo, en el que el rotor se sujeta con cojinetes para hacer las presentes mediciones.

#### 4.5.5.3.- Gráfica factor de potencia-intensidad



Gráfica 4.5: Factor de potencia-Intensidad. Entre las líneas verticales se engloban los valores máximos del factor de potencia de todas las frecuencias.

Cuando el factor de potencia es máximo, la potencia activa también. Los máximos se hallan localizados dentro del intervalo comprendido entre 16 A y 21 A, lo que indica que no es práctico pasar por exceso, o defecto, estos valores de intensidad.

En las tablas anteriores a partir de las cuales se han generado las gráficas 4.3, 4.4 y 4.5 no se han añadido los valores de potencia activa, reactiva y aparente para no hacerlas pesadas, pero no se desea dejar en el aire los valores de la potencia cuando el factor de potencia es máximo:

- 328 W para 100 Hz.
- 490 W para 125 Hz.
- 610 W para 150 Hz.
- 1620 W para 200 Hz.