

3 - DESARROLLO DE UN MOTOR LINEAL BILATERAL (M-1)

3.1- Construcción de un prototipo de motor lineal para adquisición y posterior discusión de datos.

Se trata de construir una máquina lineal para poder experimentar con ella. La alimentación será de 220 V en corriente alterna y trifásica que es una de las tensiones que se posee en los laboratorios de la "ETSE (URV)" que es donde se harán las pruebas.

El tipo de motor lineal es de estator bilateral (de doble inductor) y el inducido será una lámina de aluminio, por lo que requiere una gran longitud para su desarrollo.

Las características principales de cada semiestator, son:

Potencia útil, P:	2,5 kW
Rendimiento, η :	50 %
Tensión, U_1 :	127/220 V Δ/Y
$\cos \phi$:	0,5
m_1 :	3
Frecuencia f:	50 Hz
Longitud inductor, L:	0,3 m
Ancho inductor, C:	0,07 m
Velocidad lineal de sincronismo, V_s :	3 m/s
Pares de polos, p:	5
Corriente por fase I_1 :	26 A
Deslizamiento (supuesto) s:	20 %
Velocidad de carga $V = V_s - s V_s$:	2,4 m/s

δ (entrehierro) = (holgura mecánica + grosor inducido (2 a)) : 6 mm

2 a : 4 mm

El rendimiento de la máquina teórico, es del 50%, porque se trata de un prototipo y se proyecta la máquina para el caso más desfavorable. Además, según E.R. Laithwaite [4], este tipo de máquinas tiene un rendimiento muy bajo.

El factor de potencia teórico, es de 0,5, ya que el entrehierro es considerable.

3.2- Materiales a emplear

3.2.1 - Circuito eléctrico

3.2.1.1- Características eléctricas del inductor

Al estar la máquina abierta en los extremos, presenta una dificultad añadida por la morfología del citado motor.

El devanado debe estar constituido, como mínimo, por 5 pares de polos, para que el comportamiento que tenga la máquina pueda ser considerado como aceptable [4].

La elección del devanado es un aspecto delicado dentro del diseño del motor. Se tienen en cuenta dos posibles consideraciones, es decir, dos tipos de devanados desde un punto de vista constructivo. A saber:

- ? Devanado continuo entre ambos estatores.
- ? Devanado independiente, igual en ambos estatores.

Para el primer caso se tiene un motor de inducción lineal de estator bilateral magnético y a su vez bilateral eléctrico. Para el segundo se obtiene un motor de inducción lineal de estator bilateral magnético y dos unilaterales eléctricos, es decir, en el segundo caso se obtienen dos máquinas unilaterales encaradas independientes eléctricamente (foto 1. pág.44).

Devanado continuo entre ambos estatores:

Bobinado imbricado de dos capas, 60 ranuras - 10 polos

Forma:	Imbricado, de dos capas.
Nº de ranuras:	$n = 60$
Nº de polos:	$2p = 10$
Nº de fases:	$m = 3$
Nº de ranuras por polo y fase:	$n_{pf} = n / 2pm = 60 / 10 \cdot 3 = 2$
Nº de bobinas:	$B = n = 60$
Nº de grupos del bobinado:	$G = 2pm = 2 \cdot 5 \cdot 3 = 30$

Nº de bobinas
por grupo: $U = B / G = 60 / 30 = 2$

Paso de ranuras: $Y_k = n / 2p = 60 / 10 = 6$
Paso de bobina: $Y_B = 19 ? 26$ (diametral) 7
Paso de principios: $Y_{120} = n / 3p = 60 / 3 \cdot 5 = 4$

Se toman como
principios: U - 19, V - 23, W - 27

Devanado independiente, igual en ambos estatores:

Bobinado imbricado de dos capas, 30 ranuras - 10 polos

Forma: Imbricado, de dos capas.

Nº de ranuras: $n = 30$

Nº de polos: $2p = 10$

Nº de fases: $m = 3$

Nº de ranuras
por polo y fase: $n_{pf} = n / 2pm = 30 / 10 \cdot 3 = 1$

Nº de bobinas: $B = n = 30$

Nº de grupos
del bobinado: $G = 2pm = 2 \cdot 5 \cdot 3 = 30$

Nº de bobinas
por grupo: $U = B / G = 30 / 30 = 1$

Paso de ranuras: $Y_k = n / 2p = 30 / 10 = 3$
Paso de bobina: $Y_B = 1 ? 4$ (diametral) 3
Paso de principios: $Y_{120} = n / 3p = 30 / 3 \cdot 5 = 2$

Se toman como
principios: U - 1, V - 3, W - 5

Comparación entre devanados continuo e independiente

Según el criterio constructivo

La ubicación de los conductores en las ranuras, dada la morfología lineal de los bloques, en principio debería ser mucho más sencilla que para el caso de un motor de tipo rotativo.

Para el devanado continuo existe una complicación adicional porque este devanado se cierra entre los dos bloques estáticos. Cabe recordar en este momento que el rotor de este motor se halla constituido por una lámina carril de aluminio entre los bloques semiestáticos en el seno del entrehierro. La dificultad de construir unas cabezas de bobina entre estatores es excesiva por la interferencia con el rotor. Vuelve al conjunto muy vulnerable a los golpes. Obliga a trabajar con entrehierro fijo. Pueden pensarse otras formas constructivas de las cabezas de bobinas, pero todas suponen dificultades exageradas, sin ganancias desde el punto de vista eléctrico o magnético que compensen el encarecimiento constructivo

La rigidez añadida de las cabezas de bobina entre estatores dificulta también el encaramiento de los estatores añadiendo otra dificultad mecánica, en caso de requerir ajustes.

Para el devanado independiente por semiestatores, resulta más sencilla la ubicación de los conductores, ya que en este caso los hilos no deben cruzar la lámina carril para formar las cabezas de bobina entre estatores. Esto facilita el trabajo y disminuye las horas empleadas en la construcción.

Según el criterio eléctrico

De acuerdo con este punto de vista, el primero de los devanados es el de mejores prestaciones eléctricas. La continuidad del devanado da como resultado una mayor y mejor distribución de las fuerzas en el entrehierro, así como un mayor rendimiento frente a la segunda opción. Además las cabezas de bobina podrían ser muy cortas con lo que baja la resistencia del conjunto.

La mayor diferencia es que en el primer caso se obtiene un motor de doble cara mientras que en el segundo tenemos dos de simple cara. La máquina de doble cara tiene 10 polos con el doble de superficie. En el segundo caso se obtienen dos máquinas de 10 polos que, al encarar los bloques, da lugar a que la máquina tenga 20 polos.

Según el criterio de la velocidad

En función de lo dicho en el párrafo anterior, esta variación en el número de polos afecta al paso polar, y por lo tanto a la velocidad, según la fórmula:

$$V = \frac{L \cdot f}{p} = 2 \cdot \tau_p \cdot f \quad (m/s) \quad 3.2.1.1.a$$

Para el primer caso se obtiene una velocidad de sincronismo de 6 m/s, mientras que para el segundo caso es de unos 3 m/s. Debido al poco espacio del que disponemos (20 m), si adoptamos el de 6 m/s, sólo podremos trabajar unos 3 s con el motor, y, si adoptamos el de 3 m/s, podremos trabajar durante períodos de unos 6 s, a frecuencia industrial 50 Hz.

Por todo lo dicho anteriormente se adopta la segunda opción.

Adaptación del devanado de un motor que gira a un motor lineal

El devanado utilizado no es un devanado exclusivo de los motores lineales. Se recurre a la teoría de devanados convencionales, y se adapta un devanado convencional, siguiendo pautas que garanticen el mejor rendimiento electromagnético.

De acuerdo con la elección determinada anteriormente, se tratará de ubicar la cantidad de conductores necesarios en las ranuras del estator para obtener un motor lineal de unas características preestablecidas.

El devanado patrón del cual partimos es el de la figura 26.

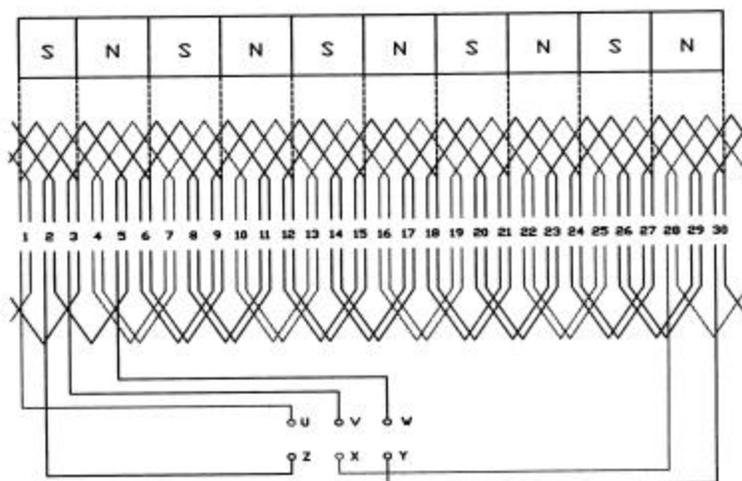


Fig. 26: Esquema eléctrico del devanado patrón para los dos inductores (imbricado de doble capa).

Como se puede ver en la figura 26, este devanado presenta una continuidad; es decir, se cierra en el lugar donde empieza y todas las ranuras están completamente ocupadas. El devanado es del tipo imbricado de doble capa.

El aspecto que tiene el devanado después de la adaptación es el siguiente (fig.27):

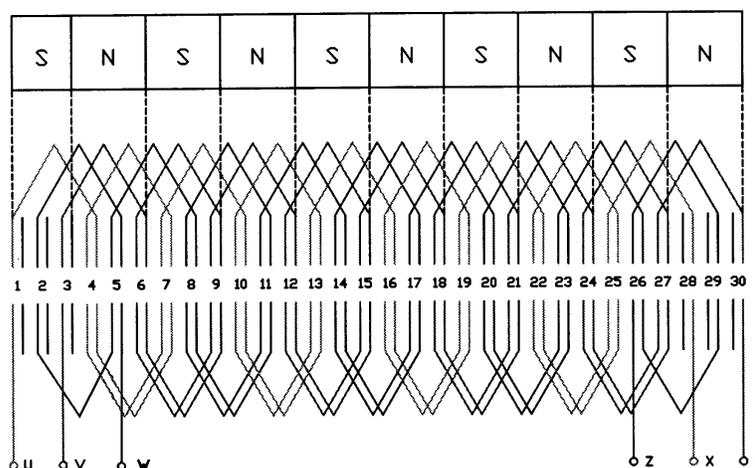


Fig. 27: Devanado del estator del motor de inducción lineal trifásico (imbricado de doble capa).

El primer aspecto a tener en cuenta es que este devanado (fig.27) presenta una serie de imperfecciones tanto en la entrada como en la salida del estator en forma

de ranuras medio llenas. Esto da lugar a los efectos de los extremos, y el resultado es una reducción en la f.m.m., y por lo tanto del rendimiento. Se escoge un devanado imbricado de doble capa por su mejor rendimiento magnético frente al de simple capa. No obstante, hoy en día se utiliza principalmente el de simple capa por motivos constructivos y de economía.

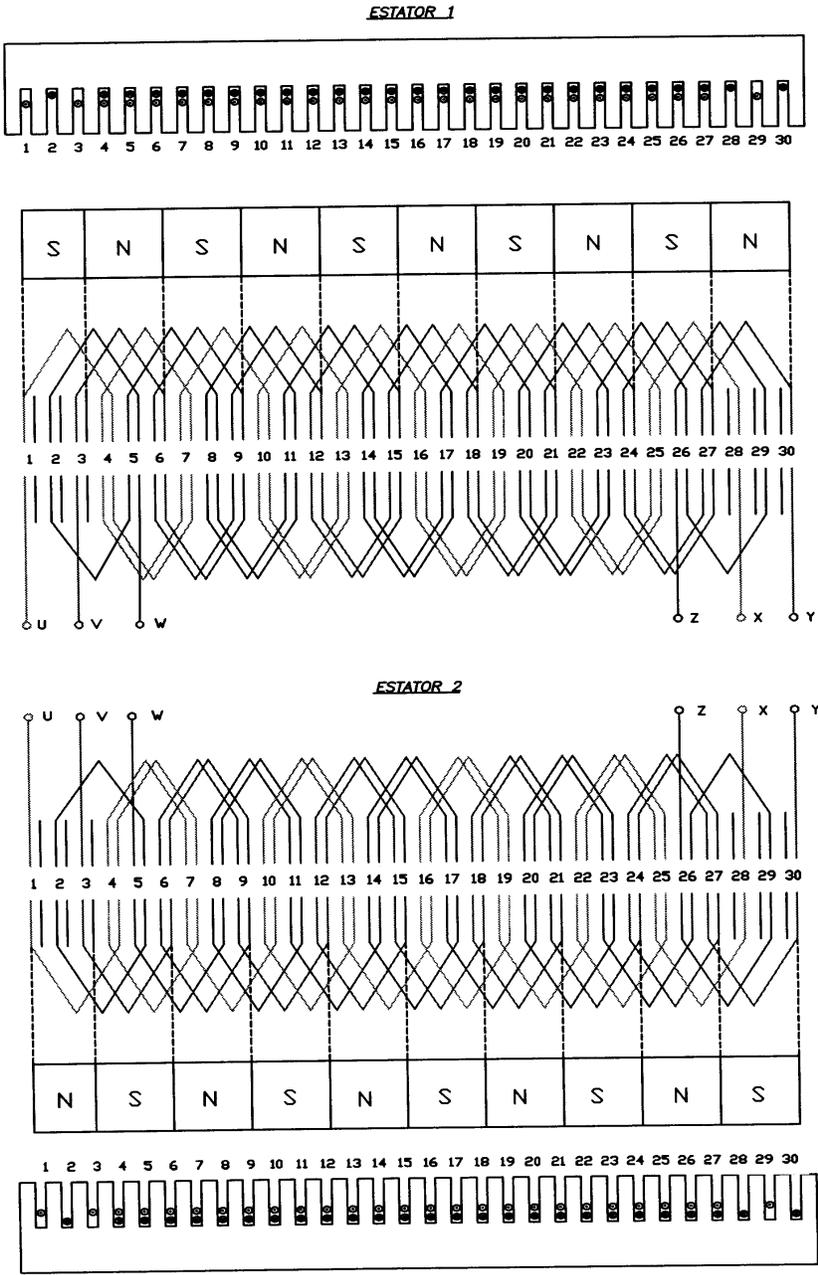


Fig.28: Devanado de los dos estatores del motor de inducción lineal trifásico (imbricado de doble capa). El material utilizado para realizar el devanado inductor ha sido hilo de cobre de 0,75 mm de diámetro.

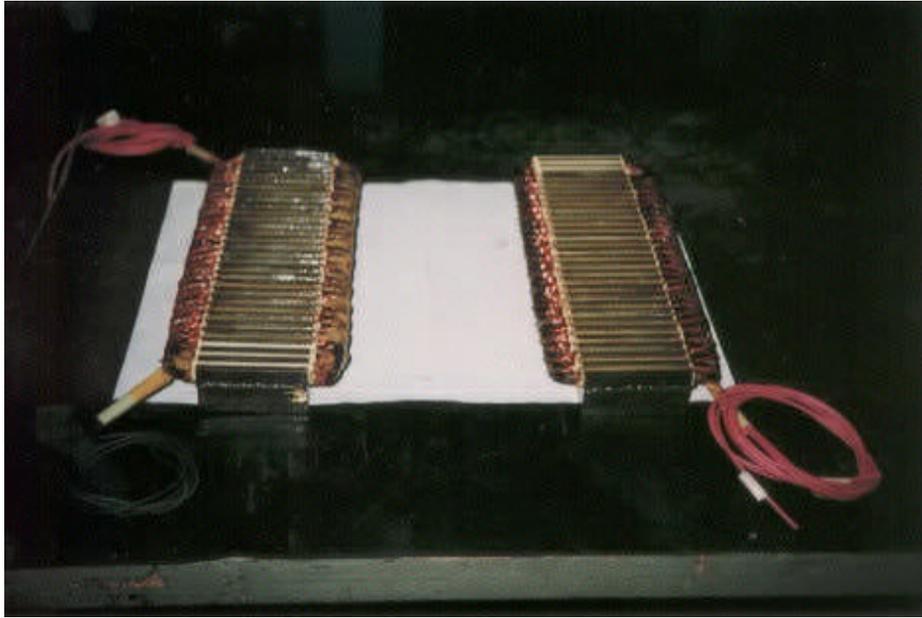


Foto. 1 : Inductor del prototipo M-1 (dos semiestatores)

Como veremos posteriormente en el apartado 3.2.2.1 y 3.2.3.2, la ranura del inductor es rectangular de 6 mm de ancho por 15 mm de profundidad, el ancho del diente es de 4 mm y la longitud de la ranura es de 70 mm. El paso de ranuras es de 3.

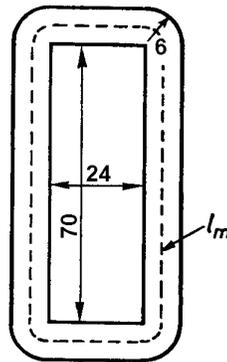


Fig. 29: Dimensión física de una bobina y longitud media de una espira.

La longitud media de una espira es entonces $2 (70 + 6 + 24 + 6) = 212 \text{ mm}$

La longitud total de una bobina de 34 espiras es de 7,208 m

El devanado de un semiinductor está constituido por tres fases, y cada fase está compuesta por 10 bobinas

La longitud de los extremos para las conexiones es del orden de 0,8 m

La longitud total del cobre es: $72,08 + 0,8 = 72,88$ m

Según la ley de ohm:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

3.2.1.1.b

R resistencia en Ω

ρ_{20} resistividad a 20°C en $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$

l longitud en m.

$$\rho_{20} = 1/56 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$$

Teóricamente la resistencia de una fase del inductor:

$$R_1 = 1/56 (72,88/0,44) = 2,95 \Omega$$

La caída de tensión que produce esta resistencia vale:

$$U_1 = R_1 I_1 = 2,95 \cdot 26 = \mathbf{76,9 \text{ V}}$$

La permeancia específica del circuito magnético de dispersión para el tipo de ranura que hemos adoptado vale $18 \mu\text{H}$:

μ_r Permeancia específica de las ranuras (fig.30):

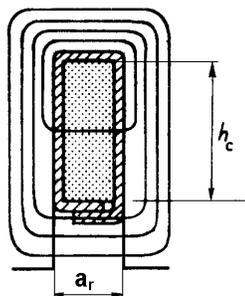


Fig. 30: Permeancia específica de las ranuras.

$$\mu_r = \frac{100 h_c}{3 a_r} \mu\text{H}$$

3.2.1.1.c

μ_r : permeancia específica de las ranuras

h_c : altura del conductor en la ranura
 a_r : ancho de la ranura

Para el tipo de ranura que tenemos:

$$\mu_r \approx \frac{100 h_c}{3 a_r} \approx \frac{15 \cdot 100}{3 \cdot 6} \approx 83 \quad (\text{WbA}^{-1} \text{m}^{-1})$$

μ_d : Permeancia específica de las cabezas de diente (fig.31):

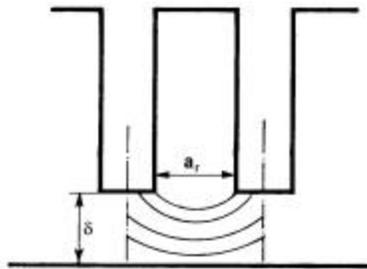


Fig. 31: Permeancia específica de las cabezas de diente.

$$\mu_d \approx \frac{100}{a_r \approx 0,8} \quad (\text{WbA}^{-1} \text{m}^{-1})$$

3.2.1.1.d

μ_d : permeancia específica de las cabezas de diente
 δ : entrehierro
 a_r : ancho de la ranura

Para las cabezas de diente que tenemos, y considerando que el entrehierro para un semiinductor es la mitad del total:

$$\mu_d \approx \frac{100}{a_r \approx 0,8} \approx \frac{3 \cdot 100}{6 \approx 0,83} \approx 36 \quad (\text{WbA}^{-1} \text{m}^{-1})$$

La permeancia específica del circuito de dispersión, despreciando la permeancia de las cabezas de bobinas vale:

$$\mu_x = \mu_r + \mu_d = 83 + 36 = 119 \quad (\text{WbA}^{-1} \text{m}^{-1})$$

La inductancia de dispersión por fase resulta:

$$L_x \approx 8 \cdot 10^{-211} p n_{pf} Z_n^2 \mu_x C \quad (\text{H})$$

3.2.1.1.e

- L_x : inductancia de dispersión por fase en H/fase
 p : pares de polos
 n_{pf} : nº de ranuras por polo y fase
 Z_n : nº de conductores por ranura
 μ_x : permeancia específica en $(WbA^{-1}m^{-1})$
 C : longitud de la ranura en m

$$L_x = 8 \cdot 10^{11} \cdot 5.168^2 \cdot 119.7 \cdot 4.88 \cdot 10^{-3} \cdot \mu_x \quad [H]$$

La reactancia de dispersión por fase resulta ser:

$$X = 2 \cdot f \cdot L_x = 2 \cdot 50 \cdot 4.88 \cdot 10^{-3} = \mathbf{1,57}$$

La f.e.m. de dispersión por fase, resulta:

$$E = X \cdot I = 1,57 \cdot 26 = \mathbf{40,82 V}$$

Según expresión paramétrica de las caídas ohmicas relativas, 18:

$$\frac{E_1}{U_1} = 1 + \frac{R_1 I_1}{U_1} \cos \varphi + \frac{X_1 I_1}{U_1} \sin \varphi \quad 3.2.1.1.f$$

$$E_1 = 127 + \frac{76,9}{127} \cdot 0,5 + \frac{40,82}{127} \cdot 0,278 = 77,552V$$

3.2.1.2 – Características eléctricas del inducido

El elemento del inducido queda reducido a una lámina conductora continua que carece de conductores singulares, y que, bajo un campo alterno, se comporta como un material diamagnético por encontrarse polos opuestos a ambos lados de dicha lámina.

En cuanto a los materiales que se pueden utilizar hay dos posibilidades: acero inoxidable austenítico (no ferromagnético) y aluminio. El cobre y el latón no suelen emplearse por sus mediocres propiedades mecánicas, de mecanizado y disponibilidad en el mercado con los perfiles adecuados.

Se elige aluminio por tres razones: su mayor conductibilidad eléctrica, su mayor poder de disipación de calor frente al acero inoxidable y el aspecto económico ya que el aluminio resulta más económico que el acero inoxidable.

La condición técnica que debe cumplir esta lámina carril es la de conducir la corriente eléctrica debido a la reacción del inducido, y la de soportar la fuerza de tracción que aparece. Según apartado 3.10 es de 66,15 N a la velocidad sincrónica y de 510,12 N en el arranque.

- ? Desde el punto de vista eléctrico interesa que esta lámina de aluminio sea lo más gruesa posible para disminuir las pérdidas por efecto Joule, y que cubra toda la superficie del inductor o estator y además abarque también las cabezas de bobina estáticas. Esto se consigue prolongando la lámina carril más allá de la altura estática (ver fig.14).
- ? Desde el punto de vista mecánico también interesa que la lámina sea gruesa para reducir los esfuerzos mecánicos que aparecen.
- ? Desde el punto de vista magnético interesa que la lámina carril sea lo más delgada posible para disminuir el entrehierro, ya que así aumentamos el rendimiento de la máquina.
- ? Para evitar el pandeo longitudinal, la forma ideal sería la “ ? ” pero estos perfiles no están disponibles en el mercado con las dimensiones necesarias. Ver detalles en el apartado 3.2.4.2.

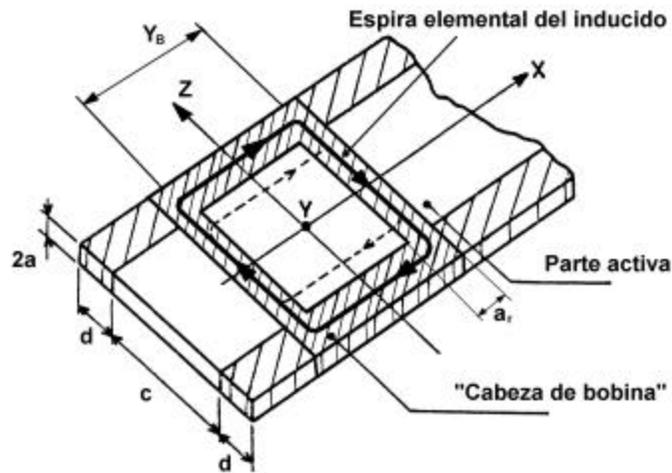


Fig. 32: Raíl inducido

Para el raíl de aluminio:

$Y_B = \text{paso de bobina del inductor} = \text{paso de bobina del inducido} = 30 \text{ mm}$

$2a = 4 \text{ mm}$

$c + 2d = 185 \text{ mm}$

$c = 70 \text{ mm}$

$2d = 115 \text{ mm}$

$d = 57,5 \text{ mm}$

Conductividad del raíl de aluminio $= 24,6 \text{ (S.m/mm}^2 \text{)} = 2,46 \cdot 10^{-7} \text{ (S/m)}$

Resistividad del raíl de aluminio $= 1/24,6 = 0,04065 \text{ (? .mm}^2 \text{ /m)}$

Resistencia de la espira teórica elemental del inducido de aluminio:

$l_{\text{parte activa}} = 2c = 2 \times 70 = 140 \text{ mm}$

$l_{\text{cabeza de bobina}} = 2 \cdot Y_B = 2 \times 30 = 60 \text{ mm}$

Hemos supuesto que el ancho de la espira elemental del inducido lo podemos dividir en dos partes de secciones diferentes: la parte de cabeza de bobina y la parte activa.

El ancho de la parte activa se supone igual al ancho de ranura del inductor que vale $a_r = 6 \text{ mm}$, pero, debido a que esta espira elemental no es discreta, esto no se puede afirmar y el ancho de la cabeza de bobina se supone que vale $d = 57,5 \text{ mm}$.

Sección de la parte activa teórica $6 \times 4 = 24 \text{ mm}^2$

$$R = \frac{l}{S} = 0,04065 \frac{.mm^2}{m} \frac{0,140m}{24mm^2} = 230??$$

Sección de la cabeza de bobina $57,5 \times 4 = 230 \text{ mm}^2$

$$R = \frac{l}{S} = 0,04065 \frac{.mm^2}{m} \frac{0,060m}{230mm^2} = 10,6??$$

La resistencia total de la espira teórica del inducido será:

$$R_2 = 230 + 10,6 = 240,6 ??$$

El problema central en el análisis de la máquina de inducción lineal es la determinación de las corrientes del secundario en función de las corrientes o de la tensión de fase del primario. El camino descrito por estas corrientes cerradas sobre si mismas en una lámina rotórica conductora e isótropa, no es trivial ni mucho menos. Su conocimiento es imprescindible para determinar la impedancia real aparente del secundario.

En el momento del arranque el motor lineal se puede considerar como un transformador con dos primarios de $N_1 = 68$ espiras y un secundario de $N_2 = 1$ espira

$$E_1 = 4,44 \cdot b_1 \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot \Phi \text{ (V)}$$

$$E_2 = 4,44 \cdot b_2 \cdot f_1 \cdot N_2 \cdot \Phi \text{ (V)}$$

Φ = flujo por polo fundamental

$b_{1} = b_{2}$ = factor de devanado = 1

La corriente teórica del inducido en el momento del arranque será:

$$I_2 = 2 \cdot I_1 \cdot (N_1 / N_2) = 2 \cdot 26 \cdot (68/1) = 3536 \text{ A}$$

Según el apartado 3.4.2 a la tensión nominal de 220 V y a la frecuencia de 50 Hz en el inductor circulan 43 A. Entonces la corriente teórica del inducido supuesto trifásico en el momento del arranque será:

$$I_2 = I_1 \cdot (N_1 / N_2) = 43 \cdot (68/1) = 2924 \text{ A}$$

Según el apartado 3.4.5. la f.e.m. inducida, en el centro del motor M-1, con la sonda de 10 espiras es de 3,11V de valor eficaz, por lo que podemos considerar que en una espira elemental sea 10 veces menor que la medida o sea de 0,311V

La potencia estática aparente disponible en el inducido es:

$$E_2 \cdot I_2 = 3 \text{ kA} \cdot 311 \text{ mV} = 1,61 \text{ kVA}$$

Si despreciamos la reactancia del inducido

$$I_2 = E_2 / R_2 = 0,311 / 0,0002406 = 1264 \text{ A}$$

Esta corriente es menor que la calculada por la relación de transformación, por lo que la resistencia de la espira elemental es menor que la estimada. La sección de la parte activa de la espira elemental del inducido debe ser de una sección mayor que la supuesta de 24 mm^2 . Si adoptamos una sección de 48 mm^2 , la corriente que circularía por esta espira elemental coincidiría con la estimada por la relación de transformación.

El calentamiento de un conductor vale θ :

$$\theta = \frac{k}{S^2} I^2 \cdot t \quad (^\circ\text{C}) \quad 3.2.1.2.a$$

θ = calentamiento en grados centígrados

S = sección del conductor en mm^2 .

k = constante del material (0,0135 para el aluminio)

I = corriente en A

t = tiempo de circulación de la corriente en segundos

Esta fórmula sirve con dos condiciones previas:

- 1. Que se desprece la cesión de calor al ambiente (régimen adiabático).
- 2. Que el calor específico del material permanezca constante, a pesar de la creciente temperatura que toma dicho material.

La sobretensión admisible en conductores desnudos de aluminio, en caso de cortocircuito, es de 180°C .

Como se ha dicho antes, hemos supuesto que el ancho de la espira elemental del inducido sea igual al ancho de la ranura del inductor que vale 6 mm , pero debido a que esta espira elemental no es discreta, esto no se puede afirmar. Por tanto, la sección de la espira elemental puede ser superior y, como vemos en la fórmula del calentamiento, la sección está afectada por el cuadrado y está en el denominador.

Al desplazarse el inductor, las corrientes inducidas también se desplazan.

La longitud del inductor es de $l = 0,3 \text{ m}$, la velocidad teórica del motor lineal M-1 es de $V = 2,5 \text{ m/s}$, por lo que el tiempo al que está sometido el inducido a esta corriente es de:

$$t = l/v = 0,3/2,5 = 0,12 \text{ s}$$

Aplicando la fórmula a nuestro caso durante estos 0,12 segundos:

$$? ? \frac{0,0135}{24^2} 2924^2 \cdot 0,12 ? 24^\circ \text{C}$$

Según el apartado 3.2.5.2, la corriente que circula por el inducido durante 3 segundos, con el inductor fijo, produce un incremento de temperatura de 7°C.

Conclusiones:

Debido a que la temperatura medida en el inducido o lámina carril es inferior a la calculada, debemos suponer que la espira elemental del inducido, que se ha supuesto como en la fig. 33, no es del todo correcta, por lo que la espira elemental del inducido es de una sección más grande como la representada en la figura 34 y/o la lámina carril actúa como disipador del calor.

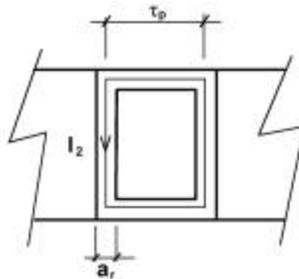


Fig. 33: Espira elemental supuesta a priori.

Si consideramos correcto el incremento de temperatura medida, y la corriente que circula por el inducido, entonces la sección **S** (supuesta uniforme) de la espira elemental del inducido resulta:

$$S ? \sqrt{\frac{0,0135}{7} 2924^2 \cdot 0,12} ? 44,5 \text{ mm}^2$$

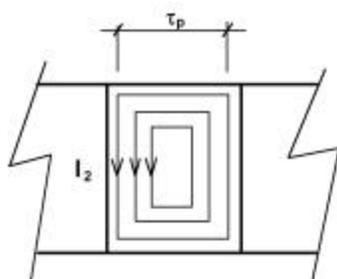


Fig. 34: Espira elemental supuesta a posteriori.

3.2.2 - Circuito dieléctrico

3.2.2.1- Características dieléctricas del inductor

El hilo de cobre del inductor es de la marca ACEBSA, de tipo IBERFIL "H", de **clase térmica H (180°C)**.

El barniz de impregnación es ROYAL DIAMOND, Tipo ROYALAC 158.

Los aislantes de ranura y fase son ROYAL DIAMOND, Tipo TRIPLEX F.20.08.

El grosor del manguito de ranura (prespan + poliéster) es de $e = 0,5$ mm, pasando la anchura de la ranura $a_r = 6$ mm a una anchura útil de $a_{re} = 5$ mm, y la altura de la ranura $h_r = 15$ mm a una altura útil de $h_{re} = 5$ mm (fig.74).

Las cuñas de cierre son de poliuretano.

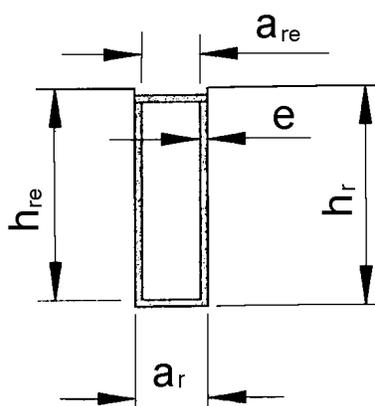


Fig. 35: Dimensiones físicas de una ranura

Los aislantes de las cabezas son de cinta de vidrio de Clase F.

Los aislantes y conductores para la salida de bornes son tubo flexible ACEBSA Tipo IBERFIL clase F, cuyas características son: tejido trenzado de vidrio, impregnación de poliuretano, **Clase térmica F (155°C)**, Rigidez dieléctrica 3000V.

El conjunto puede pues considerarse de clase térmica F con un importante margen de sobrecarga como interesa en un prototipo experimental.

3.2.2.2 – Características dieléctricas del inducido

Se decide aislar la lámina carril o el inducido del suelo. Se ha adoptado una plancha de PVC de 2 mm. Sobre la que se apoya el raíl. Los pernos de fijación se han recubierto por el centro mediante tubo flexible de 3 mm de espesor. Las tuercas que roscan sobre pernos de expansión fijados al pavimento, se han aislado de las alas soporte del raíl mediante arandelas de teflón de 2 mm de espesor. El resultado es el total aislamiento de la lámina carril del suelo.

3.2.3 - Circuito magnético

3.2.3.1 - Excitación necesaria para el prototipo M-1.

Para el prototipo de motor lineal bilateral plano, M-1, las dimensiones físicas del circuito magnético por polo son:

longitud yugo $l_y = 15 \text{ mm}$

altura yugo $h_y = 20 \text{ mm}$

altura diente $h_d = 15 \text{ mm}$

entrehierro $g = 6 \text{ mm}$

Para el cálculo de la excitación del entrehierro hemos de considerar que la máquina es bilateral, por lo que la excitación que debe proporcionar un semiinductor es, para la mitad del entrehierro ($g/2 = 0,003 \text{ m}$):

Según el apartado 3.2.3.2, consideramos una inducción en el entrehierro de 0,72 T, para la cual se requerirá una excitación de:

$$I_g = H_g \cdot g/2 = (B_g / \mu_0) g/2 = (800000 \cdot 0.72) 0,003 = 1728 \text{ A}$$

Excitación para los dientes:

$$\bar{B}_d = K_{Fe} \frac{B_g}{a_d} = \frac{1}{0,9} \frac{10}{4} 0,72 = 2 \text{ (T)}$$

Para la conservación del flujo, para tener una inducción de 0,72 T en el entrehierro, hay que mantener una inducción de 2 T en los dientes, a la que según el fabricante de las chapas magnéticas, le corresponde 250 A/cm

$$I_d = H_d \cdot h_d = 250 \cdot 1,5 = 375 \text{ A}$$

Excitación para el yugo:

$$\bar{B}_y = \frac{a_d}{h_y} \bar{B}_d = \frac{4}{20} 2 = 0,4 \text{ (T)}$$

La conservación del flujo, para tener una inducción de 2 T en los dientes, exige mantener 0,4 T en el yugo, inducción, que, según el fabricante de las chapas magnéticas le corresponde 10 A/cm

$$I_y = H_y \cdot (h_y/2 + l_y) = 10 \cdot (1 + 0,75) = 17,5 \text{ A}$$

$$H \cdot l = I_d \cdot I_y = 375 \cdot 17,5 = 6562,5 \text{ A}$$

$$I = H \cdot l = N \cdot I$$

$$I = 26 \text{ A}$$

$$N = \frac{H \cdot l}{I} = \frac{6562,5}{26} = 252,4 \text{ conductores}$$

Como se verá en la construcción del prototipo, sólo se colocarán 68 conductores por ranura, que, debido al paso de una corriente de 26 A, nos dará un total de 1904 A, un 10% menos de la excitación requerida para mantener una inducción de 0,72 T en el entrehierro, lo que se traducirá en una reducción de dicha inducción.

3.2.3.2- Circuito magnético del inductor

El estator del motor asíncrono trifásico de inducción lineal está constituido por dos bloques paralelepípedos encarados. Estos están formados por chapas magnéticas de hierro al silicio de grano no orientado, de 0,5 mm de espesor.

Se colocan 140 de estas chapas a cada lado hasta que se alcanza una altura de 70 mm para cada uno de los semiinductores estáticos. El ancho del paquete magnético es de 35 mm, la longitud de cada chapa es de 305 mm y el ancho de la culata o yugo es de 20 mm.

Las dimensiones de las ranuras vienen dadas en el apartado 3.2.2.1. Al principio se habían diseñado las ranuras con unas dimensiones de 5 mm de ancho por 15 mm de profundidad. Problemas de mecanización aconsejaron el fresado de la ranura a 6 mm de ancho.

La inducción teórica de trabajo en el entrehierro según la fórmula del cálculo paramétrico (2.1.1.g) es:

$$\hat{B}_p = \frac{E_f}{\sqrt{2} f n_{pf} Z_n CL} = \frac{127}{\sqrt{2} \cdot 50 \cdot 1.68 \cdot 0.07 \cdot 0.3} = 1.25 \text{ (T)}$$

La discontinuidad que producen las ranuras reduce la superficie útil del entrehierro, aumentando la inducción máxima en la proporción del llamado coeficiente de CARTER K_c (fig.37).

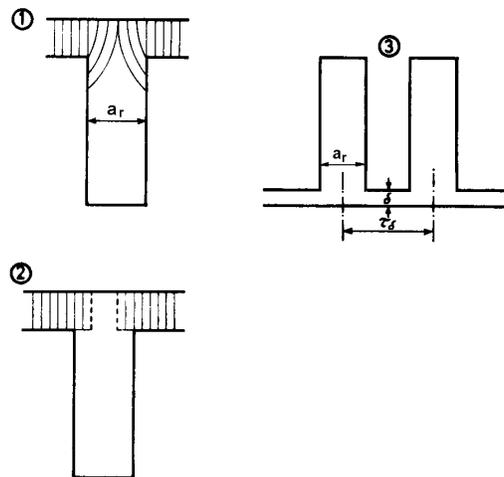
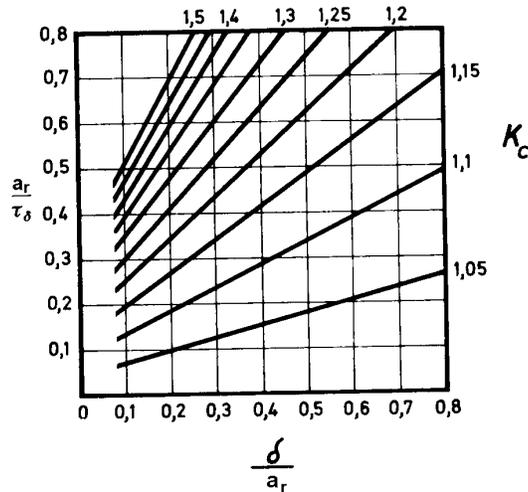


Fig. 36: Coeficiente de CARTER



g = entrehierro

a_r = ancho de salida de la ranura en el entrehierro

g_d = paso de ranuras medido sobre el mismo

Fig. 37: Cálculo gráfico del coeficiente de CARTER K_c .

Según el apartado 3.2.3.1, la f.m.m. para el entrehierro es $\mathcal{F}_g = 1728$ A/polo, y la f.m.m. para los dientes del primario o estator es $\mathcal{F}_d = 375$ A/polo. Según estos valores el “factor de saturación” $k_s = 1,22$, lo que nos da en la fig.22 un valor del factor de corrección para la amplitud con entrehierro liso de $K_M = 0,95$.

La inducción máxima en el entrehierro pasa a ser:

$$\boxed{\bar{B}_g = K_M K_C \bar{B}_g = 0,95 \cdot 1,2 \cdot 1,25 = 1,425 \text{ (T)}} \quad 3.2.3.1.a$$

La inducción teórica de trabajo en los dientes, donde su anchura es de a_d , por la expresión de la conservación del flujo, es de:

$$\boxed{\bar{B}_d = K_{Fe} \frac{\mathcal{F}_d}{a_d} \bar{B}_g = \frac{1}{0,9} \frac{10}{4} 1,425 = 3,958 \text{ (T)}} \quad 3.2.3.1.b$$

Estos 3,958 T son inadmisibles en la chapa magnética ya que consideramos que los dientes estarían saturados puesto que la inducción máxima en los dientes es de 2 T. Por tanto, la inducción máxima en el entrehierro también se reducirá en la proporción de:

$$\boxed{\bar{B}_g = \frac{1}{K_{Fe}} \frac{a_d}{\mathcal{F}_d} \bar{B}_d = 0,9 \frac{4}{10} 2 = 0,72 \text{ (T)}}$$

Las chapas de ambos semiestatores deben quedar sólidamente unidas. En las máquinas rotativas la unión de estas chapas tiene lugar merced a la simetría radial de estas máquinas. En este caso deben unirse unas chapas de forma lineal.

Una opción es la de perforar los paquetes y ubicar en estos orificios unos pernos pasantes, pero, dada la dureza de este tipo de material se precisa un diámetro considerable que comportaría unas pérdidas importantes de tipo magnético.

La segunda opción, que es la adoptada, es la unión de estas chapas mediante soldadura (fig.38). La soldadura debe ser lo más estrecha posible y situada en la culata o en las zonas donde exista el mínimo flujo de dispersión o trabajo.

Los efectos de las soldaduras son dos:

- ? La destrucción de parte del aislante, que con el tiempo queda compensado por la corrosión de la soldadura.
- ? La aparición de puntos calientes donde se pueden producir incrementos de temperatura considerables que pueden contribuir a la destrucción del bobinado.

Este fenómeno es común también en las máquinas convencionales, en las que, por algún motivo, sus chapas quedan unidas mediante soldadura.

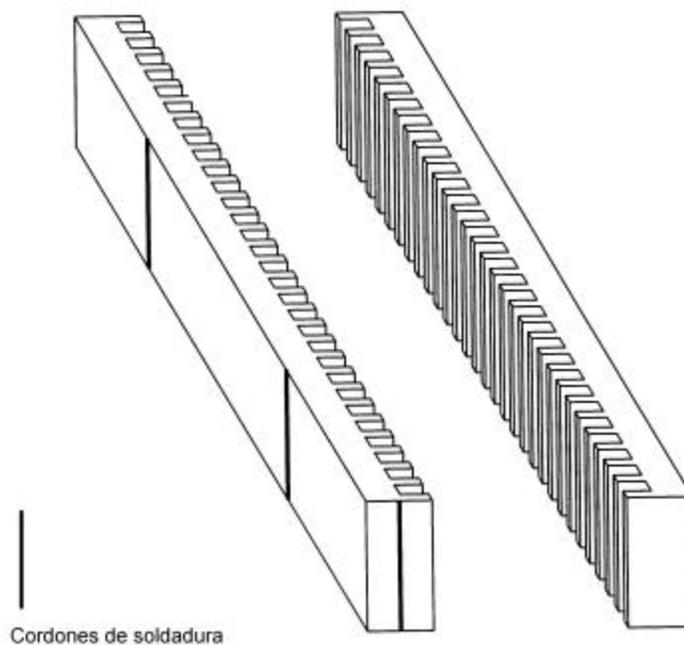


Fig. 38: Bloques magnéticos.

Una vez unidos estos bloques, se procede a su ranuración, que se realiza mediante fresadora. Las ranuras serán de forma recta, facilitándose de esta manera el mecanizado de las piezas. A cada semiinductor se le realizarán 30 ranuras de 15 mm de profundidad y 6mm de ancho, quedando por lo tanto dientes de 4 mm de ancho.

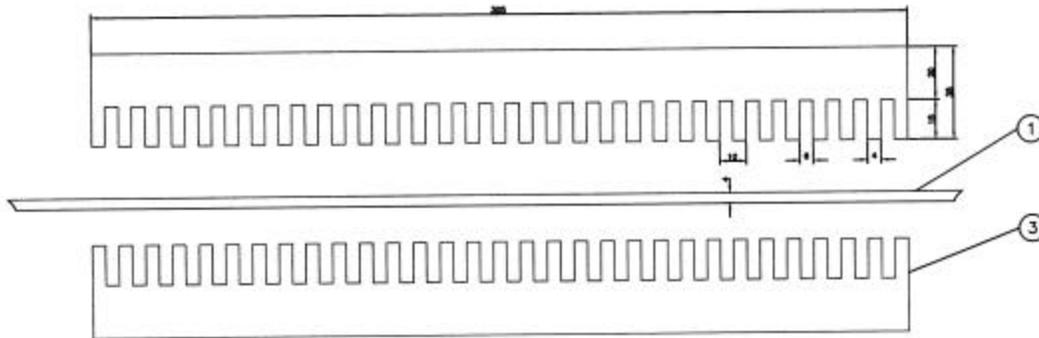


Fig. 39: Dimensiones físicas de los dos inductores.

3.2.3.3 – Circuito magnético del inducido

El circuito magnético del inducido está compuesto por la lámina carril de aluminio de 4 mm de grueso (2 a) , y de 1 mm de aire a cada lado de la lámina de aluminio como holgura mecánica, o sea en total un entrehierro (?) de 6 mm.

El aluminio se considera como aire a efectos de cálculo aunque se comporte como parcialmente diamagnético, sobre todo a altas frecuencias.

La inducción teórica en el inducido se considera la misma que en el entrehierro, igual a 0,72 T.

3.2.4 - Construcción mecánica (guiado del motor)

3.2.4.1 – Guiado del inductor

Los dos bloques estáticos de chapas magnéticas deben quedar sólidamente unidos a la distancia que corresponde a la suma del ancho del entrehierro más la

lámina carril (inducido), que es de 6 mm (los 4 mm de espesor del inducido más 1 mm a cada lado de este). Para esto se crea una estructura soporte que permite esta condición, con las tolerancias correspondientes, y que asegura el desplazamiento con una cierta suavidad.

Estructura soporte

Para la unión de los dos semiestatores se diseña una estructura soporte, que sirve para dar robustez al conjunto y por otra parte asegura el encaramiento de los polos de ambos estatores.

Esta estructura soporte tiene forma de herradura, guarda una semejanza con la forma que tienen los soportes de los contadores de inducción convencionales y se construye aplicando criterios constructivos de las máquinas lineales. Ambos estatores encajan a presión en sendas hendiduras realizadas sobre esta estructura de aluminio. Se escoge aluminio con el fin de reducir peso de la misma.

Las medidas genéricas de esta estructura son las siguientes. Un espesor de 25 mm, con el fin de dar una resistencia mecánica adecuada para el uso. Se trata de aluminio tratado con el fin de mejorar sus cualidades mecánicas. La estructura tiene 210 mm de alto. Su ancho es de 50 mm por cuestiones mecánicas.

Las fuerzas que debe soportar esta estructura soporte son principalmente las fuerzas de atracción entre los dos semiestatores, que, según se verá posteriormente en el apartado 3.9, son de 3238 N, y que están representadas en la fig.67.

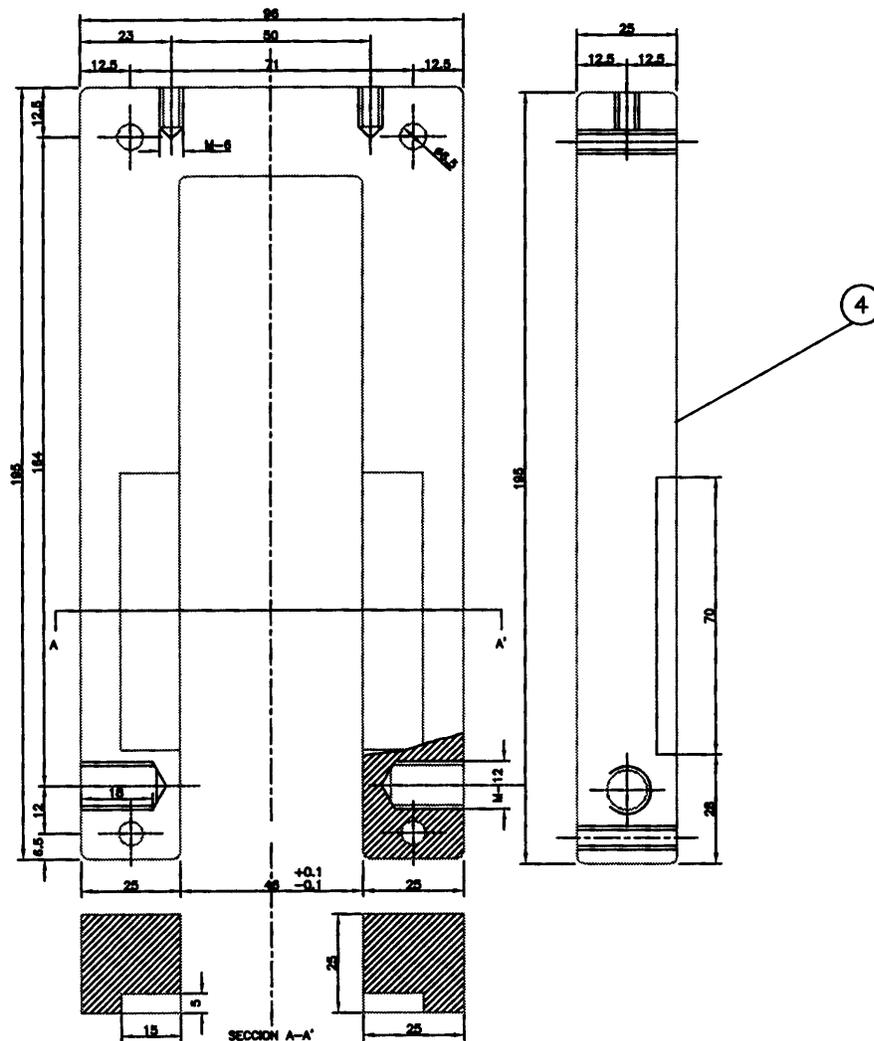


Fig. 40: 2 Estructuras soporte de aluminio, (plancha de aluminio endurecido de 25 mm)

Sobre esta estructura soporte se realizan una serie de taladros. En los situados en las caras internas van ubicados unos pernos de unión de la estructura soporte (fig.41).

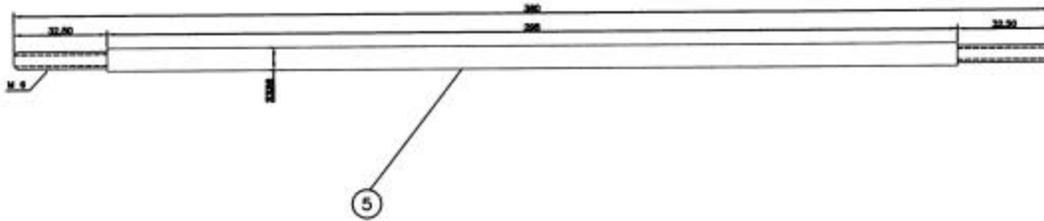


Fig. 41: Perno de unión de la estructura soporte: 4 varillas de acero inoxidable no ferrítico, roscadas.

En los taladros de la cara superior van ubicados los tornillos pasadores que soportarán la vagoneta y la caja de bornes.

En las caras exteriores de esta estructura soporte se realizan sendos taladros roscados a métrica 10, en cuyo interior van colocados los pernos que son los ejes del sistema de rodadura.

Estas dos estructuras soporte resultan insuficientes para mantener la distancia entre los dos semiestatores, debido a las fuerzas de atracción entre los dos semiestatores que las deforman exageradamente. Se debería cambiar el diseño de las dos estructuras actuales, para aumentar su rigidez respecto a las citadas fuerzas.

Perfil de rodadura

El perfil de rodadura escogido es uno rectangular de 40 x 20 x 1 mm de acero inoxidable; de esta manera se amortiguan los posibles efectos de deslizamiento en los procesos de arranque mejorando la adherencia. El material deberá ser amagnético para evitar corrientes parásitas, evitándose además problemas de corrosión y degradación.

El perfil está constituido por 4 tramos de 5 metros cada uno, dando un total de 20 metros de longitud. La unión de los perfiles se realiza a través de unos pernos pasantes y unas pletinas de unión, dando uniformidad al recorrido. Al mismo tiempo estos pernos sirven también de unión con la lámina carril (inducido), facilitándose de esta manera la alineación de estos dos elementos fundamentales para el buen funcionamiento mecánico de la máquina.

El esfuerzo mecánico que debe soportar dicho perfil es el del peso del inductor y de su estructura que es de 55 kg.



Foto. 2 : Prototipo M-1 con una rueda desmontada.

3.2.4.2 – Guiado del inducido

La condición mecánica que debe cumplir la lámina carril de aluminio es la de asegurar una buena resistencia mecánica frente a posibles esfuerzos.

El esfuerzo mecánico que debe soportar el inducido es la fuerza ficticia que, según el apartado 3.1.2.1, es de 66,15 N a 3m/s, y, en el peor de los casos, de 510 N a velocidad cero (en un arranque directo).

La alineación del carril dependerá de la sección del mismo. Si la lámina carril fuese de un espesor excesivamente estrecho se complicaría la alineación. Esta es una de las dificultades con las que se encuentra el motor de inducción lineal.

Se remachan unos perfiles en L sobre la lámina carril, que actúan a modo de aletas y que a la vez aportan una mejora mecánica para la alineación de la lámina carril. Se confirma esta disposición como especialmente adecuada, como se vio en anteriores trabajos [46].

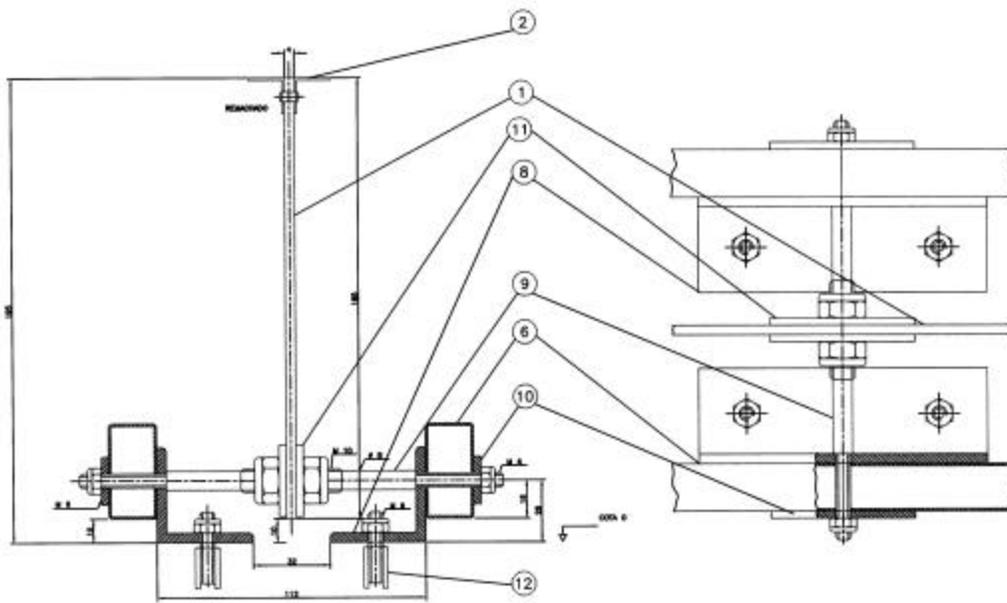


Fig. 43: Detalle de perno de unión situado en la parte central de cada plancha de aluminio de la lámina carril

Para la constitución de la lámina carril, (inducido) se emplea una plancha de aluminio de 4 mm de espesor, de 185 mm de alto con forma rectangular que se desarrolla a lo largo de todo el recorrido que se estima en unos 20 m (espacio disponible en el laboratorio de electrometría de la ETSE - URV de Tarragona, ver foto 3). Las aletas situadas verticalmente a ambos lados de la lámina carril están constituidas por unos perfiles en L de 10 x 10 mm y de 1,5 mm de espesor de aluminio. De esta manera se mejora el retorno de corrientes, debidas a las cabezas de bobinas, a través de la lámina carril, aunque con una impedancia mucho mayor que si se tratara de un perfil extruído en forma de " I ". No se tiene en cuenta esta disminución de impedancia, ya que depende de la resistencia de contacto con los remaches de unión que están situados a una distancia mas grande que el paso polar.

La disposición de los citados perfiles angulares de aluminio sobre la lámina carril se realiza mediante remachado al tresbolillo, dando una configuración semejante a una viga de tipo IPN. Los tramos de unión entre planchas están ligados mediante tornillos, lo que facilita las labores de alineamiento del carril así como su montaje y desmontaje, caso que deba trasladarse. En los tramos centrales, y para dar endurancia, estos perfiles están remachados. Así se puede obtener una longitud de carril ilimitada con perfiles de tipo comercial. El incremento del momento de inercia horizontal de la sección permite espaciar notablemente los soportes de carril. La lámina carril está soportada sobre el suelo mediante unos pernos que dan un aspecto semejante al de las traviesas del ferrocarril. Estos se colocan a una

distancia de un metro, viniendo determinada esta distancia por las planchas comerciales de aluminio que son de 2x1 metros, regulándose con estos pernos de fijación la alineación de la lámina carril y los perfiles de rodadura (fig.43).

Para el emplazamiento de la lámina carril sobre el suelo, se soporta los pernos de fijación sobre unas L de acero inoxidable de 40x40x4 mm con 12 mm de longitud. Para dar solidez al conjunto estos tramos en L de acero inoxidable están anclados al suelo mediante unos pernos de expansión.



Foto. 3 : Carril inducido, instalado en los laboratorios de Máquinas eléctricas de la E.T.S.E. - U.R.V.



Foto. 4 : Detalle Carril inducido.

3.2.5 - Circuito refrigeración

3.2.5.1 – Refrigeración del inductor

Es importante calcular el incremento de temperatura que sufrirá el inductor, por efecto Joule, durante los cortos períodos de prueba que no dan tiempo a una disipación apreciable del calor desarrollado, ya que se emplea prácticamente toda esta energía en elevar la temperatura de los conductores (régimen adiabático).

Si la resistencia permaneciera constante durante el calentamiento, el ritmo de calentamiento en grados centígrados por segundo para el cobre sería $\frac{J^2}{\sigma t}$:

$$\frac{J^2}{\sigma t} = \frac{J^2}{3,56} \frac{C}{s} \quad (3.2.5.1.a)$$

- J densidad de corriente (A/mm^2)
- σ conductividad ($S.m/mm^2$)
- T temperatura ($^{\circ}C$)
- t tiempo (s)

El cálculo directo del aumento de temperatura final T_2 requiere el uso de una ecuación logarítmica:

$$\lg \frac{T_2}{T_1} = \lg \frac{T_0 + T_2}{T_0 + T_1} = K t \quad (3.2.5.1.b)$$

T_0 es la temperatura “eléctrica” absoluta del conductor correspondiente a los cero °C ($T_0 = 235^\circ$ para el Cu y $T_0 = 230^\circ$ para el Al).

La conductividad del cobre comercial a 20°C vale $\sigma = 56 \text{ S.m/mm}^2$.

$$K = \frac{\sigma^2}{116} 10^{23} \quad (3.2.5.1.c)$$

La resistencia de los devanados varía con la temperatura según [18]:

$$\frac{R_{\theta'}}{R_{\theta}} = \frac{T_0 + \alpha \theta'}{T_0 + \alpha \theta} \quad (3.2.5.1.d)$$

- θ Temperatura ambiente = Temperatura devanados
- R_{θ} Resistencia de una fase a la temperatura θ
- $R_{\theta'}$ Resistencia de una fase a la temperatura θ'
- θ' Temperatura de un devanado

Se han medido temperaturas, de los devanados y del inducido, y la variación de la resistencia de los devanados del inductor.

La temperatura se ha medido mediante un polímetro digital DM-6055C (Lutron) con un termopar (tipo k) TP-01 hasta 250°C con una resolución de 1°C, (tabla 1).

θ (°C) medida	θ' (°C) medida	θ (°C)	R_{θ} (Ω)	$R_{\theta'}$ (Ω)	t (s)	V	I (A)
15	27	12	3,4	3,6	6	220	43
20	34	14		3,8	6	220	43
25	45	20		3,9	6	220	43
32	48	16		3,9	6	220	43
31	36	5		3,8	3	220	43

Tabla 1: Medidas de temperatura, y parámetros eléctricos del inductor, del prototipo M-1

El inductor se refrigera por convección natural y por el propio deslizamiento de la máquina respecto al aire, ya que los tiempos de funcionamiento de la máquina hacen que no sea necesario una refrigeración forzada, al trabajar en régimen adiabático.

Para el caso de una necesidad de refrigeración mayor, se pueden acoplar perfectamente unos ventiladores en los estatores.

3.2.5.2- Refrigeración de inducido

El inducido está formado por una lámina de aluminio, donde la parte activa del mismo es muy pequeña respecto a la superficie total, por lo que se facilita mucho la refrigeración por convección de forma natural, y por conducción longitudinal a través del resto de lámina.

Si la resistencia permaneciera constante durante el calentamiento, el ritmo de calentamiento en grados centígrados por segundo, para el aluminio, sería 19:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{I^2 R}{2,56 \rho} \quad (3.2.5.2.a)$$

- ρ densidad de corriente (A/mm²)
- σ conductividad (S.m/mm²)
- T temperatura (°C)
- t tiempo (s)

El cálculo directo del aumento de temperatura final ΔT requiere el uso de una ecuación logarítmica:

$$\lg \frac{T_2}{T_1} = \lg \frac{T_0 + \Delta T_2}{T_0 + \Delta T_1} = K \Delta t \quad (3.2.5.1.b)$$

T₀ es la temperatura “eléctrica” absoluta del conductor correspondiente a los cero °C (T₀ = 230° para el Al).

La conductividad del aluminio inyectado a 20°C vale σ = 33 S.m/mm².

$$K = \frac{I^2 R}{53,2} 10^{23} \quad (3.2.5.2.b)$$

No se ha instalado ningún sistema de control de temperatura en el inducido. Al tratarse de una lámina conductora, se mide la temperatura a través de una sonda de temperatura (tabla 2):

T ₁ (°C)	T ₂ (°C) medida	ΔT (°C)	R ₁ (Ω)	R ₂ (Ω)	Δt (s)	V (inductor)	I (A) (inductor)
19	26	7	No se puede medir	No se puede medir	3	220	43

Tabla 2: Medidas de temperatura, y parámetros eléctricos del inducido, del prototipo M-1

3.3 - Prototipo Motor lineal plano con inductor trifásico bilateral (M-1)

El acabado final del prototipo M-1 queda según la figura 44.

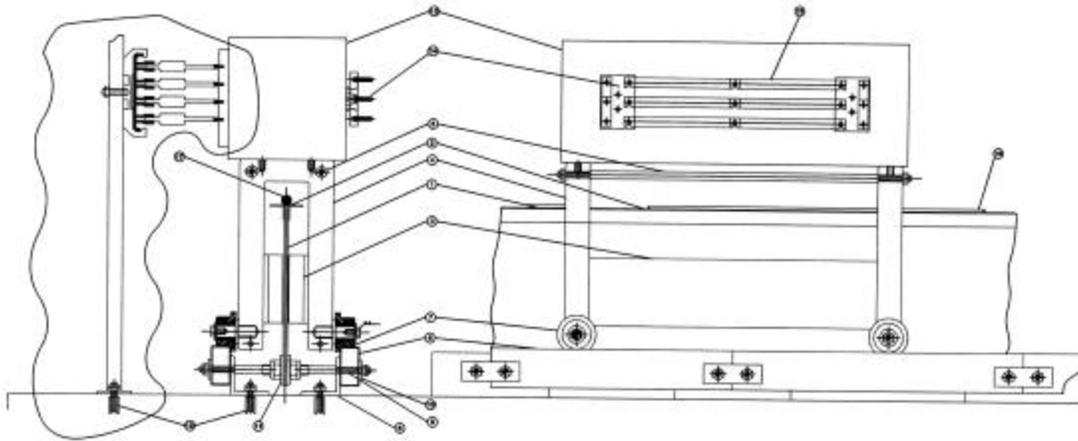


Fig. 44: Vista general del prototipo de motor lineal bilateral.

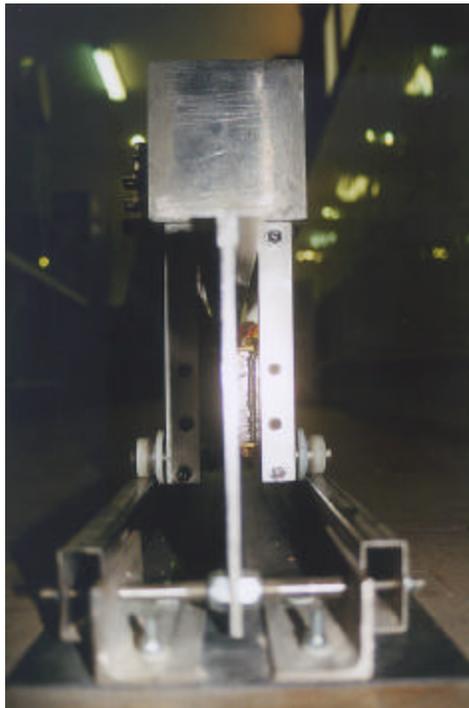


Foto. 5 : Conjunto del Prototipo M-1, inductor-carril inducido, visto de frente.



Foto. 6 : Conjunto del Prototipo M-1, inductor-carril inducido, visto de perfil.

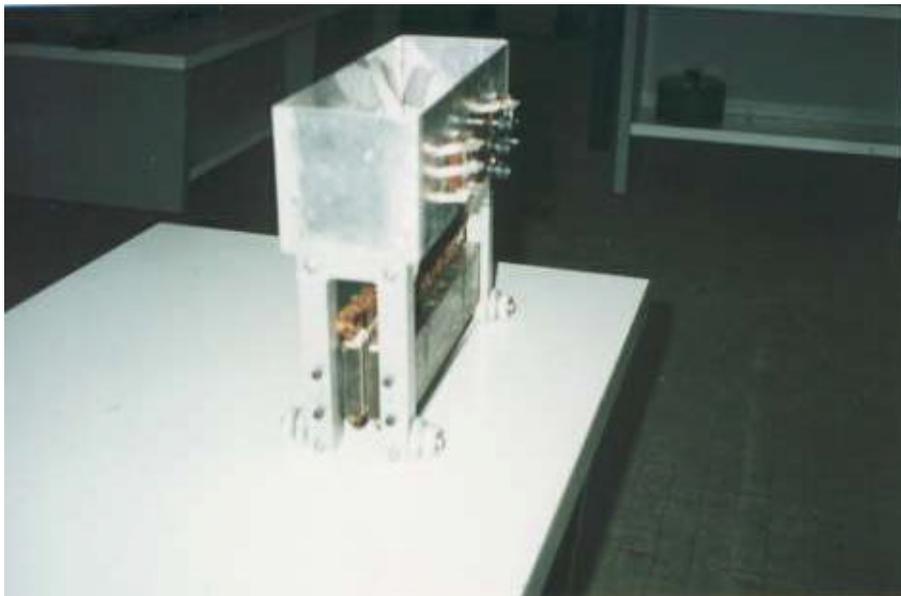


Foto. 7 : Perspectiva del prototipo M-1, sin la lámina carril.

La conexión eléctrica entre el prototipo M-1 y la fuente de alimentación se realiza mediante un cable flexible, por razones económicas y de fiabilidad dado el bajo número de maniobras a realizar. El cable es pentapolar de $2,5 \text{ mm}^2$ de 15 m de longitud. Se alimenta el conjunto desde el centro del raíl, así el trayecto del motor se minimiza a 10 m para cada lado.