

## 5 - DESARROLLO DE UN MOTOR LINEAL TUBULAR MONOFÁSICO CON ESPIRA DE SOMBRA (M-3)

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

Se ha construido un motor lineal plano bilateral trifásico (M-1) y un motor lineal tubular unilateral bifásico (M-2), y los dos funcionan.

El prototipo M-1 se ha alimentado a través de una red industrial trifásica a 220V y 50 Hz, y el prototipo M-2 se ha alimentado a través de una fuente de corriente a 50 Hz.

Se quiere construir un tercer prototipo al que se le llama M-3, con la intención de comprobar su funcionamiento en frecuencias superiores a las industriales. Para construir el nuevo prototipo M-3 será necesario una fuente de alimentación adecuada a la potencia demandada y a la frecuencia de trabajo.

Se recurre a las fuentes de alimentación disponibles, de alta frecuencia monofásica (5000 Hz), y al laboratorio de Alta Tensión de la ETSEI de la UPC de Barcelona.

La fuente de alimentación de 5000Hz tiene las siguientes características:

Fuente de alimentación:

Tensión de red ( $V_{RMS}$ ):	220 V trifásico
Corriente nominal ( $I_{RMS}$ ):	40 A
Frecuencia :	50 Hz
Potencia aparente:	15 kVA

Circuito L-C:

Tensión nominal ( $V_{RMS}$ ):	90 V
Corriente nominal ( $I_{RMS}$ ):	533 A
Frecuencia:	5 kHz
Potencia aparente:	110 kVA
$R_1$ :	2,35 m $\Omega$ / 4,95 m $\Omega$
$R_2$ :	3,3 m $\Omega$ / 5,10 m $\Omega$
C:	116 $\mu$ F
$L_1$ :	5,52 $\mu$ H
$L_2$ :	7,48 $\mu$ H
Refrigeración (agua):	3 litros/minuto

Para la construcción del nuevo prototipo M-3, se hace un nuevo diseño:

- ? Conductores redondos, tan cercanos al inducido como sea posible (minimizando el entrehierro).

- ? La refrigeración será por aire por convección natural.
- ? Para adecuar el bobinado a la fuente de alimentación se realiza un devanado monofásico y con una espira por polo y fase, con espira de sombra.
- ? El inductor es unilateral y con las espiras en serie accesibles sólo por los extremos del inductor.
- ? El paso polar es del orden del centímetro.

Se pretende ver la influencia de la frecuencia y el efecto tractor sobre un tubo de material conductor (aluminio).

El procedimiento constructivo es muy simplificado.

Se pretende hacer un paso polar lo más corto posible, por lo que se eliminarán los dientes.

Se pretende construir una máquina lineal tubular monofásica y el inducido será un tubo de aluminio.

La potencia y tensión de alimentación se definirán después de realizar algún ensayo, debido a la limitación de la temperatura del devanado, ya que a 5000 Hz el efecto skin será más pronunciado que a 50 Hz:

El prototipo M-3, tendrá las siguientes características:

Rendimiento :	50%
cos ? :	0,5
$m_1$ :	1
Frecuencia, f:	5000 Hz
Longitud inductor, L:	0,5 m
Diámetro inductor, D:	0,065 m
Velocidad lineal de sincronismo, $V_s$ :	50 m/s
Pares de polos, p:	50

En este prototipo el entrehierro es todo el circuito magnético, que es aire, incluido el inducido.  $\delta = 35$  mm

2 a: 4 mm

## 5.2- Materiales a emplear

## 5.2.1 - Circuito eléctrico

### 5.2.1.1- Inductor

En este prototipo se quiere ver la viabilidad de la utilización de la frecuencia en los motores lineales, por lo que el devanado sólo será de un sólo conductor.

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].

Desde un punto de vista constructivo, tenemos:

Bobinado ondulado de una capa, 100 ranuras - 100 polos

Forma: ondulado, de una capa.

Nº de ranuras:  $n = 100$

Nº de polos:  $2p = 100$

Nº de fases:  $m = 1$

Nº de ranuras  
por polo y fase:  $n_{pf} = n / 2pm = 1$

Nº de bobinas:  $B = 100$

Se toman como  
principios:  $U - 1, V - 100$

Si se consideran las espiras de sombra que están alojadas en ranuras, entonces tendremos en total 200 ranuras, y los principios del devanado serían: U-1, V -200.

#### Según el criterio constructivo

La ubicación de los conductores se realizará sobre un tubo de PVC, dado que se quiere experimentar en alta frecuencia. Se elimina el hierro en este prototipo (M-3).

### Según el criterio eléctrico

De acuerdo con este punto de vista, el devanado de un motor lineal tubular es el de mejores prestaciones eléctricas frente al de los motores lineales planos o a los rotativos, dado que las cabezas de bobina se reducen a un único conductor que une dos bobinas de dos ranuras diferentes. Para nuestro caso en que sólo utilizamos un conductor por ranura, este factor no nos mejora el devanado, pero nuestro objetivo no es el de obtener una máquina eléctrica de gran rendimiento, sino comprobar el funcionamiento en alta frecuencia.

### Según el criterio de la velocidad

En función del número de polos que afecta al paso polar, y por lo tanto a la velocidad, según la fórmula:

$$V = \frac{L \cdot f}{p} \quad (m/s) \quad (1.2.a)$$

Longitud motor lineal tubular, L:	0,50 m
Frecuencia, f:	5000 Hz
Nº de pares de polos, p :	50

Se obtiene una velocidad de sincronismo de 50 m/s. Debido que sólo queremos medir la fuerza que puede realizar el motor, el inducido puede reducirse a la longitud del inductor.

### **Adaptación de un devanado de un motor que gira a un motor lineal**

Se recurre a la teoría de devanados convencionales y se adapta un devanado convencional.

Se escoge un devanado ondulado simple por motivos constructivos.

Teniendo en cuenta que el prototipo M-3 es lineal tubular y que cada ranura encierra una bobina creando un par de polos, se representa cada bobina en dos ranuras distintas, cuando en realidad está construido en una sola. Lo mismo ocurre con las espiras de sombra.

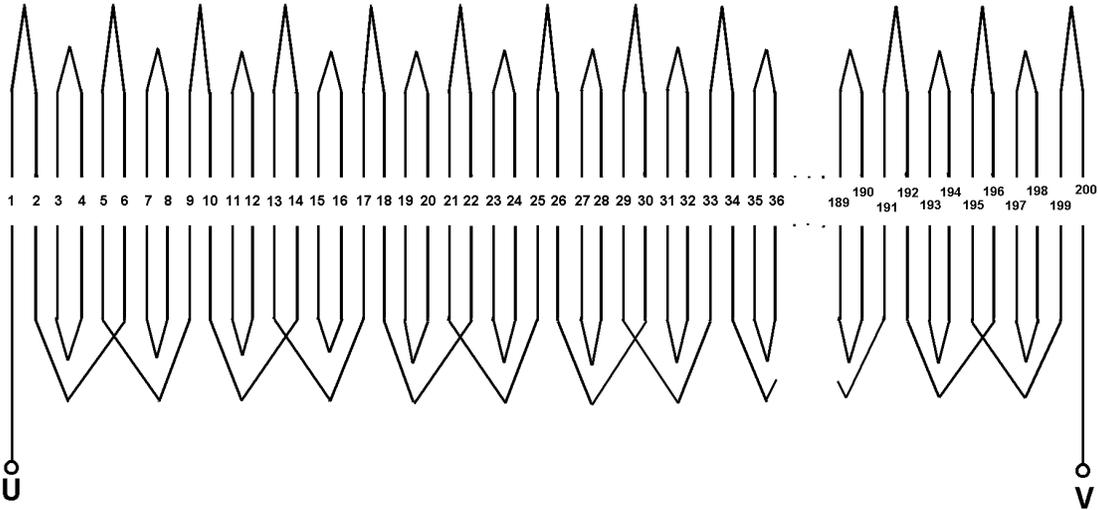


Fig.80: Esquema eléctrico del devanado del motor de inducción lineal tubular monofásico M-3 (ondulado de simple capa).

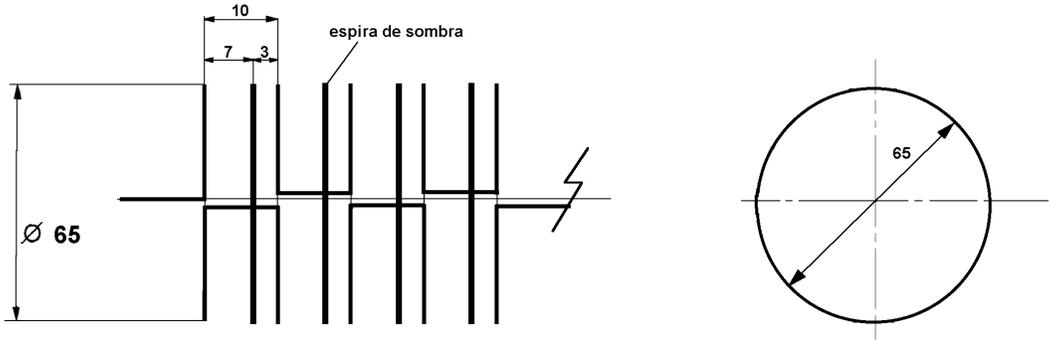


Fig.81: Devanado del inductor M-3.

La espira de sombra se coloca a 2/3 de la distancia del paso polar.

El material utilizado para realizar el devanado inductor ha sido hilo de cobre de 1mm de diámetro, lo mismo que para la espira de sombra.

En cada uno de los dos extremos del devanado inductor se les ha soldado una pletina de cobre con estaño para poder realizar las conexiones eléctricas oportunas con las fuentes de alimentación de alta frecuencia (foto 16).

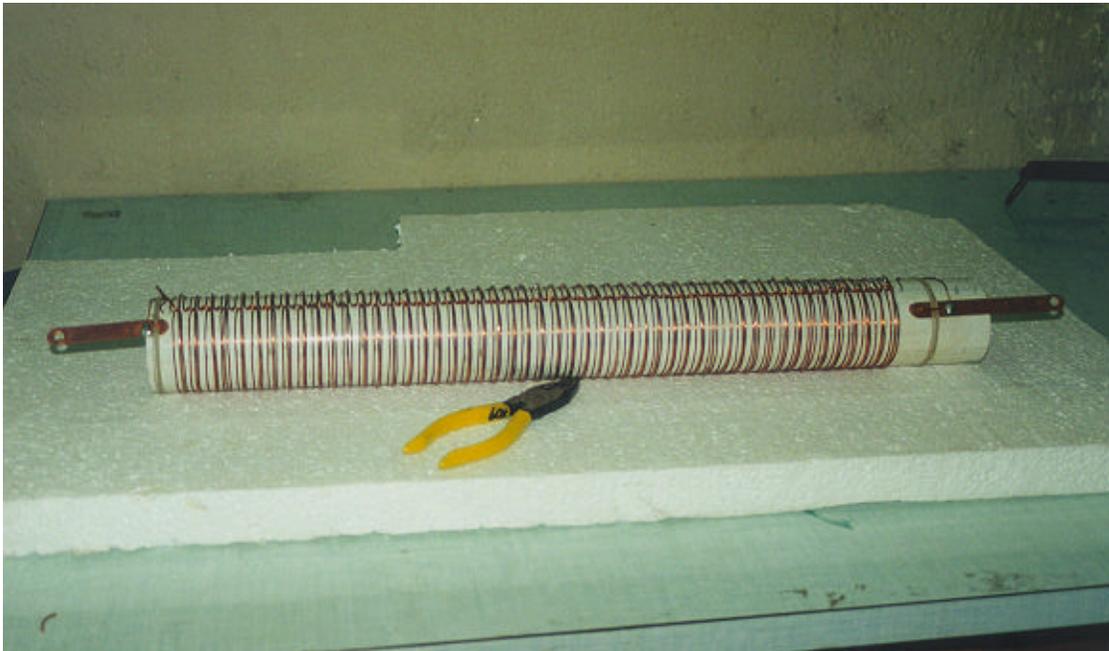


Foto. 16 : Prototipo M-3.

De la figura 120 se deduce que la longitud total de una bobina es de:

$$l = n^{\circ} \text{ de espiras} \cdot (\pi \cdot D) = 50 (\pi \cdot 65) = 10205 \text{ mm}$$

$$l \text{ de las cabezas de bobina: } 50 \text{ cabezas de bobina} \cdot 10\text{mm} = 500 \text{ mm}$$

La longitud total del cobre es:  $10205 + 500 = 10705 \text{ mm}$  , aproximamos a 10,7 m.

La sección de la espira es de  $0,785 \text{ mm}^2$ .

Según la ley de Ohm:

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

3.2.1.1.b

R resistencia en  $\Omega$   
 $\rho_{20}$  resistividad a 20°C en  $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$   
 l longitud en m.  
 S sección en  $\text{mm}^2$

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

Teóricamente la resistencia del inductor será:

$$R_1 = 1/56 (10,7/0,785) = \mathbf{0,243 \Omega}$$

Según el apartado 7.3.1 las mediciones efectuadas nos dan que la resistencia del inductor a 5000 Hz vale  $0,486 \Omega$ .

La caída de tensión que produce esta resistencia al circular 70 A, vale:

$$U_1 = R_1 I_1 = 0,486 \cdot 70 = \mathbf{34,02 \text{ V}}$$

La permeancia específica del circuito magnético de dispersión para el tipo de ranura que hemos adoptado vale  $18 \text{ WbA}^2/\text{m}^2$ :

$\mu_r$  Permeancia específica de las ranuras:

$$\mu_r = \frac{100 h_c}{3 a_r} \text{ WbA}^2/\text{m}^2 \quad (3.2.1.1.c)$$

$\mu_r$ : 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:

$$\mu_r = \frac{h_c}{3 a_r} = \frac{100}{31} = 3,23 \text{ WbA}^2/\text{m}^2$$

$\mu_d$  Permeancia específica de las cabezas de diente:

$$\mu_d = \frac{100}{a_r} = 0,8 \text{ WbA}^2/\text{m}^2 \quad (3.2.1.1.d)$$

$\mu_d$  : permeancia específica de las cabezas de diente  
 $\mu$  : entrehierro  
 $a_r$  : ancho de la ranura

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

$$\mu_d = \frac{100 \cdot \mu}{a_r} = \frac{100 \cdot 35}{1 \cdot 0,835} = 120 \text{ (Wb.A}^{-1}\text{.m}^{-1}\text{)}$$

La permeancia específica del circuito de dispersión:

$$\mu_x = \mu_r + \mu_d = 33 + 120 = 153 \text{ (Wb.A}^{-1}\text{.m}^{-1}\text{)}$$

La inductancia de dispersión por fase resulta ser:

$$L_x = 8 \cdot 10^{211} p n_{pf} Z_n^2 \mu_x C \quad \text{(3.2.1.1.e)}$$

- $L_x$  : inductancia de dispersión por fase en H
- $p$  : pares de polos
- $n_{pf}$  : nº de ranuras por polo y fase
- $Z_n$  : nº de conductores por ranura
- $\mu_x$  : permeancia específica en Wb.A<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup>
- $C$  : longitud de la ranura en m (la mitad de la circunferencia)

$$C = (2 \cdot 0,0325) / 2 = 0,10205 \text{ m}$$

$$L_x = 8 \cdot 10^{211} 50 \cdot 1 \cdot 1^2 \cdot 1,53 \cdot 0,10205 \cdot 19,6 \cdot 10^{-6} \text{ H}$$

La reactancia de dispersión por fase resulta ser:

$$X = 2 \cdot f \cdot L_x = 2 \cdot 5000 \cdot 19,6 \cdot 10^{-6} = 0,614 \text{ ?}$$

Según el apartado 5.3.1 las mediciones efectuadas nos dan que la reactancia del inductor vale 0,333 ? , ( 0,333/0,614 = 0,54 veces lo previsto)

La f.e.m. de dispersión por fase resulta ser:  $E = X \cdot I = 0,333 \cdot 70 = 23,31 \text{ V}$

### Espira de sombra

De la figura 81 se deduce que la longitud total de la espira de sombra es de:

$$l = \pi \cdot D = \pi \cdot 0,065 = 0,204 \text{ m}$$

La sección de la espira es de  $0,785 \text{ mm}^2$ .

Según la ley de Ohm:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (3.2.1.1.b)$$

- R : resistencia en  $\Omega$
- $\rho_{20}$  : resistividad a  $20^\circ\text{C}$  en  $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$
- l : longitud en m.
- S : sección en  $\text{mm}^2$

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

Teóricamente la resistencia de la espira de sombra será:

$$R_{es} = 1/56 (0,204/0,785) = \mathbf{0,0046 \Omega}$$

La permeancia específica del circuito de dispersión de la espira de sombra se puede considerar que es la misma que la del devanado inductor:

$$\mu_x = \mu_r + \mu_d = 33 + 120 = 153 \text{ (Wb} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}\text{)}$$

La inductancia de dispersión por espira de sombra es equivalente a la inductancia de dispersión por fase, igualando  $p=1$  que resulta ser:

$$L_x = \frac{8 \cdot 10^{11} \cdot p \cdot n_{pf}^2 \cdot \mu_x \cdot C}{Z_n} \text{ (H)} \quad (3.2.1.1.e)$$

- $L_x$  : inductancia de dispersión por fase en H
- p : pares de polos
- $n_{pf}$  : nº de ranuras por polo y fase
- $Z_n$  : nº de conductores por ranura
- $\mu_x$  : permeancia específica en  $\text{Wb} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$
- C : longitud de la ranura en m

$$C = 2 \cdot \pi \cdot 0,0325 = 0,2041 \text{ m}$$

$$L_x = \frac{8 \cdot 10^{11} \cdot 1 \cdot 1^2 \cdot 153 \cdot 0,2041}{0,78 \cdot 10^6} \text{ (H)}$$

La reactancia de dispersión por espira de sombra resulta ser:

$$X_{es} = 2 \cdot f \cdot (L_x) = 2 \cdot 5000 \cdot (0,78 \cdot 10^{-6}) = 0,024$$

Si consideramos que el valor real es 0,54 veces lo calculado, según hemos visto anteriormente, entonces  $X_{es} = 0,013$

La relación  $X_{es}/R_{es} = 2,82$

La relación  $R_{es}/X_{es} = 0,35$

### 5.2.1.2 - Inducido

El elemento del inducido queda reducido a un tubo conductor continuo que carece de conductores singulares.

Se elige aluminio por dos razones:

- ? El mayor poder de disipación de calor del aluminio frente al acero inoxidable.
- ? El aspecto económico, pues el aluminio resulta más económico que el acero inoxidable y el cobre.

La condición técnica que debe cumplir este tubo conductor es la de conducir la corriente eléctrica debido a la reacción del inducido, y la de soportar las fuerzas de tracción que puedan aparecer.

- ? Desde el punto de vista eléctrico interesa que este tubo conductor de aluminio sea lo más grueso posible para disminuir las pérdidas por efecto Joule, y que cubra toda la superficie del inductor o estator.
- ? Desde el punto de vista mecánico también interesa que el tubo sea grueso para soportar los esfuerzos mecánicos que aparecen.
- ? Desde el punto de vista magnético interesa que el tubo conductor sea lo más delgado posible para disminuir el entrehierro, ya que así aumentamos el rendimiento de la máquina.

El tubo-inducido del prototipo M-3 es similar al del prototipo M-2 (ver fig. 73).

Para el tubo de aluminio:

$$Y_B = \text{paso de bobina del inductor} = \text{paso de bobina del inducido} = 10 \text{ mm}$$
$$2a = (D-D')/2 = (58 - 55)/2 = 1,5 \text{ mm}$$

$$c = 2 \cdot ((D+D')/2) = 2 \cdot ((58 + 55)/2) = 354,82 \text{ mm}$$

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

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

Resistencia de la espira teórica elemental del inducido de aluminio :

$$l_{\text{ parte activa}} = c = 355 \text{ mm}$$

$$l_{\text{ total}} = l_{\text{ parte activa}} = 355 \text{ mm}$$

Hemos supuesto que el ancho de la espira elemental del inducido es igual al ancho de la ranura del inductor que vale  $a_r = 2 \text{ mm}$ , pero debido a que esta espira elemental no es discreta, esto no se puede afirmar, por lo que, con la experiencia del prototipo M-1, adoptamos  $4 \text{ mm}$ .

Sección de la espira teórica elemental  $4 \times 1,5 = 6 \text{ mm}^2$

$$R = \frac{l}{S} = 0,04065 \frac{\cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \frac{0,305 \text{ m}}{6 \text{ mm}^2} = 0,002066$$

El problema central en el análisis de la máquina de inducción lineal es la determinación de las corrientes del secundario (y el camino de la circulación de estas corrientes) en función de las corrientes o de la tensión de fase del primario.

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

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

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

$\Phi$  = flujo por polo fundamental

$$b_{11} = b_{22} = \text{factor de devanado} = 1$$

Según el apartado 5.3.2, con una tensión de  $2,8 \text{ V}$  y a la frecuencia de  $5000 \text{ Hz}$  en el inductor circulan  $70 \text{ A}$ ; entonces, la corriente teórica del inducido en el momento del arranque:

$$I_2 = I_1 \cdot (N_1 / N_2) = 70 (1/1) = 70 \text{ A}$$

## 5.2.2 - Circuito dieléctrico

### 5.2.2.1 - Inductor

Debido a que se utiliza hilo de cobre esmaltado y que éste se arrolla directamente sobre un tubo de PVC, no hay ningún problema de aislamiento obteniéndose de esta manera un total aislamiento entre devanados y entre devanados y masa.

Debido a que la tensión que se le aplica al motor es baja, sólo se comprueba el aislamiento con un polímetro.

### 5.2.2.2 - Inducido

Se decide no aislar el tubo-inducido ya que el aislamiento del inductor es total y no hay ningún peligro para el manejo del motor.

## 5.2.3 - Circuito magnético

### 5.2.3.1 - Excitación necesaria para el prototipo M-3.

Para el prototipo de motor lineal unilateral tubular M-3 las dimensiones físicas del circuito magnético por polo son:

longitud yugo	$l_y = 5 \text{ mm}$
altura yugo	$h_y = 1 \text{ mm}$
altura diente	$h_d = 0 \text{ mm}$
entrehierro	$\delta = 35 \text{ mm}$

Al no haber hierro en el circuito magnético, el recorrido de las líneas de fuerza son por el aire  $\delta = 35 \text{ mm}$

Según el apartado 5.2.3.2, consideramos una inducción en el entrehierro de 0,434 T, para la cual se requerirá una excitación de:

$$H_{\delta} = H_{\delta} \cdot \delta = (B_{\delta} / \mu_0) \delta = (800000 \cdot 0,434) 0,035 = 12152 \text{ A}$$

$$H_{\delta} = H_{\delta} \cdot \delta = 12152 \text{ A}$$

$$H_{\delta} = H \cdot l = N \cdot I$$

$I = 70 \text{ A}$

$$N \approx \frac{H \cdot l}{I} \approx \frac{12152}{70} \approx 174 \text{ conductores}$$

Como veremos, en la construcción del prototipo sólo se colocará 1 conductor por ranura, lo que, debido al paso de una corriente de 70 A por conductor, nos darán 70 A, un 0,57% de la requerida para mantener una inducción de 0,434 T en el entrehierro, traduciéndose en una reducción de dicha inducción.

Como el 100 % de la excitación necesaria es para mantener la inducción de diseño en el entrehierro, podemos considerar que la inducción varía de forma lineal con la intensidad del campo magnético  $H$ , y éste de forma lineal con los conductores. Por lo tanto, si reducimos el 99,43% de los conductores necesarios para mantener la inducción de 0,00434 T, la inducción del entrehierro también se reducirá en la misma proporción:

$$0,00434 \cdot 0,0057 = 0,000025 \text{ T}$$

Teóricamente la inducción en el entrehierro del prototipo M-3 es de 25 $\mu$ T.

### 5.2.3.2- Inductor

El inductor es unilateral externo ya que la parte activa es la exterior y el inducido es interno. El cierre de las líneas de fuerza se realiza a través del aire ya que a una frecuencia de 5000 Hz las pérdidas en el hierro caldearían el propio hierro. El campo magnético de trabajo será débil.

El estator-inductor del motor tubular monofásico de inducción lineal está constituido por un tubo de PVC de 65 mm de diámetro y una longitud de 600 mm., al que se le ha colocado el devanado inductor directamente, mientras que el inducido es colocado libremente en su interior.

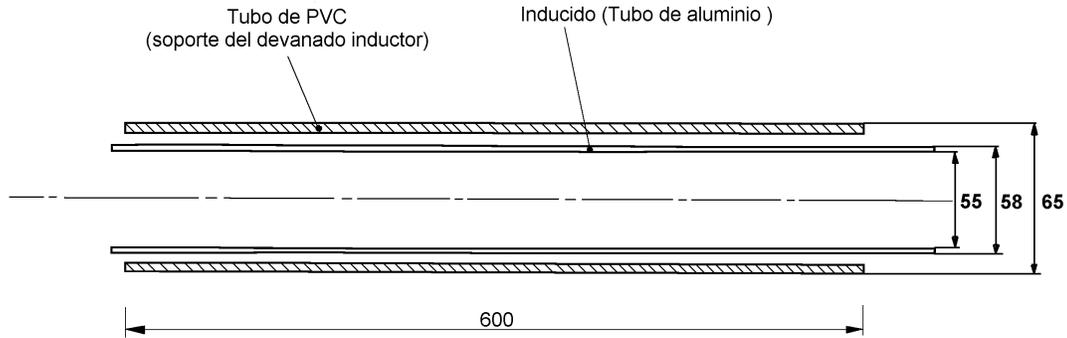


Fig.82 : Motor lineal tubular monofásico con espira de sombra (bifásico virtual) (M-3)

La inducción teórica de trabajo en el entrehierro según la fórmula del cálculo paramétrico (2.5.a) es de:

$$\hat{B}_? = \frac{E_f}{4,44 f n_{pf} Z_n} \cdot \frac{2,8}{4,44 \cdot 5000 \cdot 1,1 \cdot 0,50 \cdot 0,058} = 0,00434(T)$$

Debido a que el prototipo M-3 no tiene ranuras, tampoco tendrá una discontinuidad del campo magnético en el entrehierro, y no se verá afectada la inducción por el coeficiente de CARTER  $K_c$ .

Según el apartado 2.1.1, el factor de corrección para la amplitud con entrehierro liso vale  $K_M = 1$ .

La inducción máxima en el entrehierro pasa a ser:

$$\hat{B}_? = K_M \hat{B}_? = 1,0 \cdot 0,00434 = 0,00434(T) \quad (2.1.1.b)$$

Según el apartado 5.2.3.1, la inducción teórica en el entrehierro del prototipo M-3, con las correcciones oportunas, es de 25 T.

### 5.2.3.3 - Inducido

El circuito magnético del inducido está compuesto por un tubo de aluminio de 55 mm de diámetro interno y de 58 mm de diámetro externo de material conductor.

La cara externa del inducido está a 3,5 mm de la cara interna del inductor y todo el circuito es aire.

La inducción teórica en el inducido se considera la misma que en el inductor, igual a  $25\% T$ .

## **5.2.4 - Construcción mecánica (guiado del motor)**

### **5.2.4.1 - Inductor**

El inductor está emplazado directamente sobre un tubo de PVC que tiene la misión de dejar un espacio libre en su interior para poder desplazarse el inducido.

No se le ha mecanizado ningún tipo de guiado del inducido.

### **5.2.4.2 - Inducido**

La condición mecánica que debe cumplir el tubo de aluminio (inducido) es la de asegurar una buena resistencia mecánica frente a posibles esfuerzos.

El tubo de aluminio es de 58 mm de diámetro externo y 55 mm de diámetro interno y una longitud de 600 mm.

## **5.2.5 - Circuito refrigeración**

### **5.2.5.1 - Inductor**

El inductor se refrigera por convección ya que los tiempos de funcionamiento de la máquina hacen que no sea necesario una refrigeración forzada al trabajar en régimen adiabático.

### **5.2.5.2- Inducido**

El inducido está formado por un tubo de aluminio, donde todo él es parte activa, aunque, debido a que no está aislado y que trabajamos durante tiempos muy cortos, no hay peligro de que se nos caliente excesivamente el aluminio.

### 5.3 - Mediciones y ensayos realizados del prototipo de motor lineal tubular con inductor monofásico con espira de sombra (M-3)

#### 5.3.1 - Mediciones de las impedancias de los devanados del inductor

Mediciones de los devanados (tabla 14)

Frecuencia	Z(m <sup>2</sup> ) (medido)	L (? H) (medido)	X <sub>L</sub> (m <sup>2</sup> ) (calculado)	R(m <sup>2</sup> ) (calculado)
Sin tubo interior				
5000 Hz	590,81	10,607	333	486
500 Hz	590,27	10,619		
Con tubo interior				
5000 Hz	743 = 590+153	10,354	325	667= 486+181
500 Hz	596 = 590+6	10,439		

Tabla 14: Impedancias del inductor del prototipo M-3

Las mediciones se han realizado con un Analizador de la casa Solartron Schlumberger modelo 1260 IMPEDANCE/GAIN-PHASE ANALIZER

De las mediciones efectuadas en los devanados del inductor, se puede ver que las espiras de sombra se comportan como un rotor (inducido) mejor acoplado magnéticamente que el rotor de aluminio. El acoplamiento sin el tubo de aluminio (inducido) es débil, pero el tubo de aluminio mejora su acoplamiento.

El acoplamiento (Rotor+espira de sombra) - (Estator) mejora con la frecuencia, aproximadamente un 25%. Cuando al inductor va montado con el tubo de aluminio a 500 Hz la impedancia es de 590 + 6 m<sup>2</sup> , y cuando es de 5000 Hz la impedancia aumenta de valor a 590 +153 m<sup>2</sup> .

La inductancia del inductor con el tubo interior disminuye ligeramente respecto a cuando no existe el tubo interior (tubo de aluminio - inducido). Puede ser debido al apantallamiento del campo magnético por el aluminio, que actúa como diamagnético. El efecto es más evidente en el caso de 5000 Hz. Una geometría más adecuada, mejoraría este efecto.

Según el apartado 5.2.1.1 la resistencia teórica calculada es de 243 m<sup>2</sup> , y la reactancia teórica calculada es de 614 m<sup>2</sup> . Podemos considerar que la desviación significativa con la resistencia medida, se debe a las dos soldaduras realizadas, y la desviación significativa con la reactancia medida es debida a la imprecisión de los cálculos empleados.

### 5.3.2 - Pruebas de tracción con deslizamiento $S=1$ , del prototipo M-3.

Se han realizado dos tipos de pruebas de tracción del motor tubular monofásico de espira de sombra con un tubo de aluminio como inducido sin refrigerar el inductor.

#### **Prueba de tracción realizada con el prototipo M-3 alimentado con la fuente de alta frecuencia (5 kHz).**

Los resultados se muestran en la tabla 15.

El montaje de la prueba se puede ver en las fotos 17 y 18.

La onda de tensión aplicada de 5kHz al motor lineal tubular monofásico, con un tubo de aluminio como inducido, para la prueba de tracción se puede observar en la figura 83.

	U (V)	I (A)	Fuerza
Con inducido	0,75	12,5	inapreciable
Sin inducido	0,75	15	inapreciable
Con inducido	1,8	32	vibra como una reactancia
Sin inducido	1,8	40	vibra como una reactancia
Con inducido	2,4	45	vibra como una reactancia
Sin inducido	2,6	60	vibra como una reactancia
Con inducido	2,8	70	vibra como una reactancia
Sin inducido	3,5	110	vibra como una reactancia
Con inducido	3	65	deja de vibrar
Sin inducido	2	85	deja de vibrar

Tabla 15: Valores de la fuerza de tracción del prototipo M-3, en función de la tensión aplicada y corriente absorbida.

No se aprecia fuerza alguna sobre el inducido.

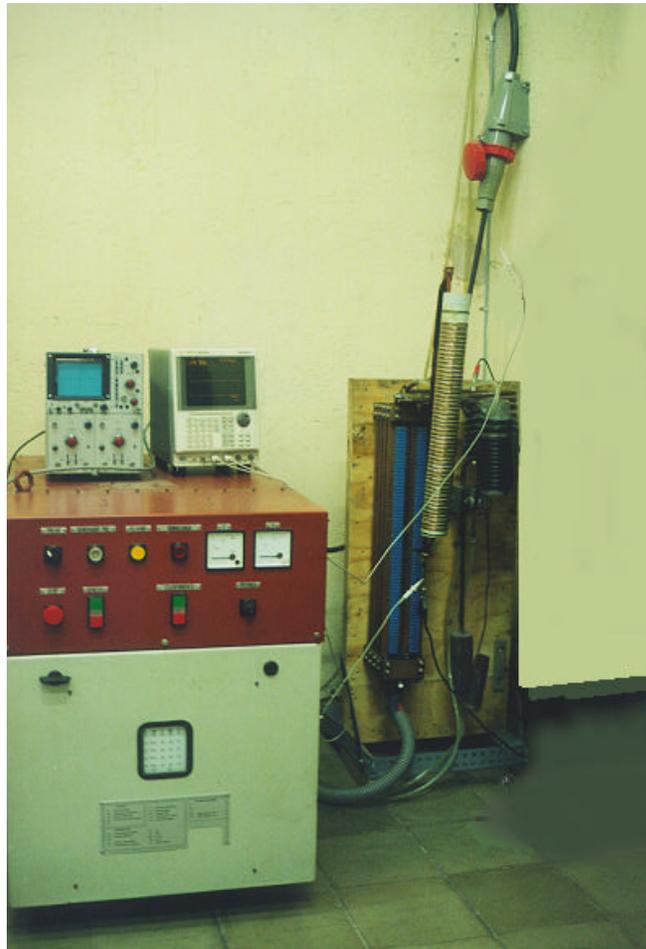


Foto. 17 : Ensayo del Prototipo M-3 alimentado con la fuente de alta frecuencia (5 kHz).



Foto. 18 : Detalle del prototipo M-3, conectado a la fuente de alta frecuencia (5 kHz).

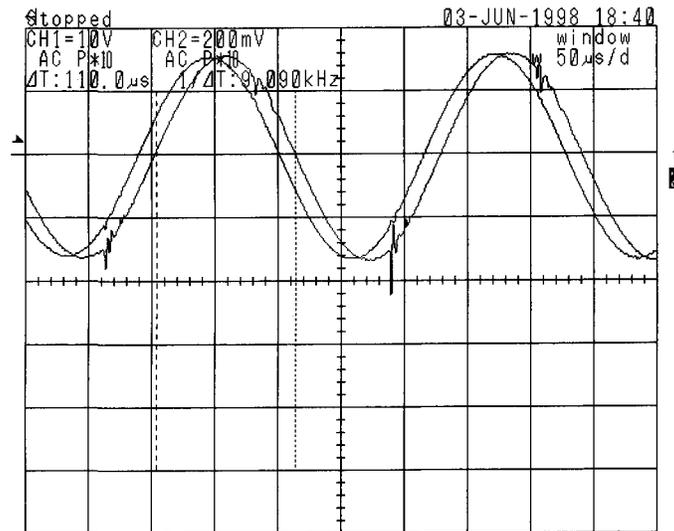


Fig. 83: Ondas de tensión aplicadas de 5kHz al motor lineal tubular monofásico, con un tubo de aluminio como inducido.

### 5.3.3 - Prueba de tracción realizada con el prototipo M-3 alimentado con una fuente de Alta Tensión.

Se le ha aplicado al prototipo M-3 una onda de 6,9 kV como la de la figura 84. El tiempo del “semiperíodo” es de 30 μs y el shunt utilizado para medir la corriente es de 0,2425 Ω.

El montaje para el ensayo de la prueba de tracción en alta tensión se puede ver en las fotos 19, 20, 21 y 22.

La energía absorbida es aproximadamente de 1335 Julios.

Tampoco se ha detectado ningún movimiento en el inducido.



Foto. 19 : Laboratorio de Alta Tensión de la UPC, donde se han realizado pruebas con el prototipo M-3.



Foto. 20 : Detalle del conexionado del prototipo M-3 a la fuente de Alta Tensión, regulada a 6,9 kV mediante la distancia entre las esferas.

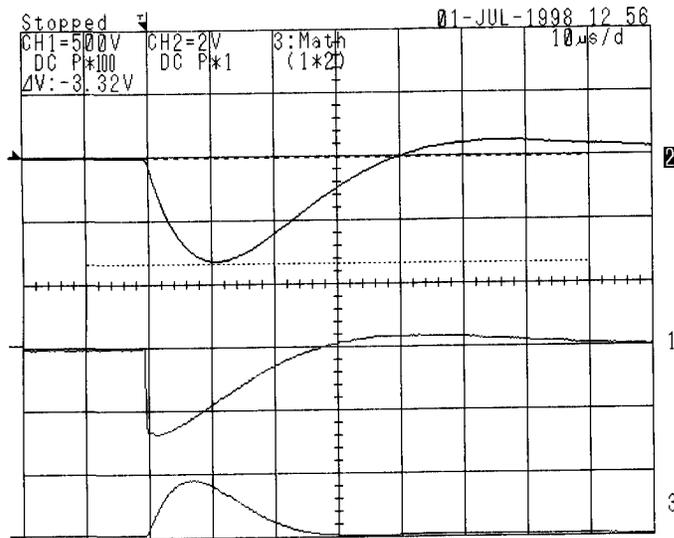


Fig. 84: Onda aplicada de 6,9 kV y 13,4 kA al prototipo M-3, y onda de potencia instantánea consumida.

### 5.3.4 - Fuerza de tracción del motor lineal M-3

En el motor lineal tubular tenemos 1 conductor por ranura y teóricamente 2,5 mT, siendo la longitud afectada de 0,5 m.

Para el cálculo de la carga lineal partimos de los valores siguientes:

- $2p = 100$
- $m = 2$
- $n_{pf} = 1$
- $Z_n = 1$
- $I_f = 110 \text{ A}$
- $L = 0,5 \text{ m}$

**$q = 22000 \text{ A/m}$**  (suponiendo que por la espira de sombra circule la misma corriente que por el devanado)

Sustituyendo los valores en la fórmula (2.7.b) de la fuerza ficticia:

- $D = 0,065 \text{ m}$
- $L = 0,5 \text{ m}$
- $q = 22000 \text{ A/m}$
- $B = 25 \text{ T}$

Fuerza ficticia en bornes:  **$F_b = 0,04 \text{ N}$**

Teóricamente el factor de potencia vale 0,5, por lo que la fuerza ficticia en N valdría:

$$F_{b\text{-total}} \cdot \cos\phi = 0,02 \text{ N}$$

Esta fuerza ficticia, como ya definíamos en el apartado 2.3 y 2.7, es la relación entre la potencia en bornes de la máquina  $P_b$  y la velocidad lineal del campo a velocidad sincrónica  $V_s$  de 50m/s.

$$F_b \approx \frac{P_b}{V_s} \quad \text{?N?} \quad (2.3.a)$$

De esta potencia en bornes, parte es degradada en calor por efecto Joule en la resistencia de los devanados primarios y secundario y parte en el hierro del estator.

Para poder comprobar los resultados teóricos es necesario realizar un ensayo donde poder medir la fuerza ejercida en función de la velocidad.

Según el apartado 5.3.2, el prototipo M-3 no ejerce ninguna fuerza.

### Resumen

Prototipo	Fuerza de tracción medida (N) ( $v=0$ )	Fuerza ficticia (N)
M-3	0	0,02

Tabla 16: Resumen de fuerzas en el prototipo M-3

### 5.3.5 - Tiempo y fuerza de aceleración del prototipo M-3

En el prototipo M-3, la masa que debe acelerarse es el inducido, que es un tubo de aluminio con un diámetro exterior de 58 mm y un diámetro interior de 55 mm, y una longitud de 600 mm. La densidad específica del aluminio es de  $2,7 \text{ kg/dm}^3$ . Con estas dimensiones del tubo de aluminio, éste presenta una masa de 0,431 kg.

La masa que debe acelerarse hasta la velocidad de régimen es de 0,431 kg. La velocidad de sincronismo es de 50 m/s, desconociéndose el deslizamiento real porque no se ha conseguido apreciar desplazamiento. Por tanto la velocidad de régimen adoptada es de 50 m/s.

Si el tiempo de arranque del prototipo M-3 lo suponemos de 1 segundo, la fuerza de aceleración necesaria será de:

Partiendo de la ecuación:

$$F_a = m \cdot (V/T) \quad (2.9.b)$$

$F_a$  : N  
 $V$  : m/s  
 $T$  : s  
 $m$  : kg

$$F_a = 0,431 \text{ kg} \cdot (50 \text{ m/s}^2) = 21,55 \text{ N}$$

Según el apartado 5.3.2, vemos que la fuerza medida es inapreciable, el apartado 5.3.4 confirma que la fuerza ficticia es insuficiente para mover el rotor en este caso.

La potencia absorbida por el prototipo M-3, cuando está alimentado a 5 kHz , 2,8 V y consumiendo 70 A, es de 196 VA.

Para llevar la masa 0,431 kg del inducido a una velocidad de 50 m/s con una aceleración de  $a=g$ , (los dos prototipos anteriores  $a \gg g$ ) suponiendo un rendimiento del prototipo M-3 de un 50%, se necesita una potencia de:

$$P = m \cdot a \cdot V / ? = (0,431 \text{ kg} \cdot 9,81 \cdot 50 \text{ m/s}) / 0,5 = 422,8 \text{ W}$$

Siendo una potencia superior a la que realmente tenemos (196 VA).

Cuando el prototipo M-3 se ha alimentado con la fuente de Alta Tensión, y se le ha aplicado una tensión de choque de 6,9 kV ,según la figura 84, la energía absorbida de la fuente de Alta Tensión la podemos aproximar a 1335 Julios.

Podemos aproximar la frecuencia de la tensión de choque a  $1/T$ ,siendo T el tiempo en segundos de un período, que en nuestro caso es el doble del tiempo aplicado, o sea 60  $\mu$ s:

$$f = 1/T = 1/60 \cdot 10^{-6} = 16.666 \text{ Hz}$$

En este caso la velocidad de sincronismo del prototipo M-3 pasaría a ser de

$$V = \frac{L \cdot f}{p} = \frac{0,5 \cdot 16666}{50} = 166,66 \text{ (m/s)}$$

El tiempo de aplicación de la onda de tensión es de 30  $\mu$ s ( $30 \cdot 10^{-6}$  s), por tanto durante este tiempo el inducido podría recorrer:

$$h = v \cdot t = 166,66 \text{ m/s} \cdot 30 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 0,005 \text{ m}$$

La energía necesaria para llevar la masa de 0,431 kg del inducido a una velocidad de 166,66 m/s, y elevarlo 0,005m es de:

$$E = mgh + \frac{1}{2}mv^2 = m\left(g h + \frac{1}{2}v^2\right)$$

5.3.4.a

$E = 5986$  Julios

El tiempo de aplicación de la energía en una descarga singular con la fuente de alta tensión (1335 Julios) es inferior a la energía necesaria (5986 Julios) para poder mover el prototipo M-3.

### **Conclusiones:**

La energía a aplicar al prototipo M-3 tiene que ser superior a la aplicada para poder observar algún efecto.

El efecto de la espira de sombra es insuficiente. Debería calcularse con métodos numéricos y/o construirse nuevos prototipos con la experiencia adquirida. La espira de sombra debe acercarse como mínimo a  $\frac{1}{4}$  del paso polar.

La comprobación del efecto de la espira de sombra sobre la f.m.m. en el entrehierro se ha realizado por simulación con un programa para tal efecto [23], preparándose así el camino para trabajos futuros.

La simplicidad de operación con espira de sombra, justifica su estudio, por los beneficios tecnológicos potenciales que supone.

### **5.3.6 - Observaciones.**

Al trabajar a frecuencias elevadas, la velocidad de sincronismo del inducido es elevada, necesitando una fuente de energía elevada, lo que nos restringe los ensayos a realizar y los resultados.

El prototipo M-3, inductor monofásico con espira de sombra (inductor bifásico virtual), representa los límites de nuestra investigación con los recursos económicos y con la infraestructura de los laboratorios disponibles.

Se han hecho ensayos con la conexión SCOTT, que demuestran la idoneidad del paso trifásico a bifásico reversible, pero no se han podido implementar todavía en la fuente TS.

### **5.3.7 - Conclusiones.**

El acoplamiento entre el inductor y el inducido no es bueno, debido principalmente al circuito magnético dispuesto, aire, y a la f.m.m. disponible en el entrehierro, el cual lo hemos simulado y añadido en esta Tesis en forma de anexo '23'.

Se han utilizado dos fuentes singulares de alta frecuencia para poder comprobar el efecto del acoplamiento entre inductor y el inducido, siendo los resultados negativos aparentemente.

Ante estos resultados se plantea realizar la construcción de otros prototipos.

Esta construcción queda fuera del alcance del presente trabajo.

## 6 - COMPROBACIÓN DEL CÁLCULO PARAMÉTRICO

Según el apartado 3.4.4, el prototipo M-1 (motor lineal, plano bilateral) absorbe unos 16 kVA, y según la ecuación 2.2.c, tenemos que la potencia teórica en bornes del prototipo M-1 vale unos 4,4 kVA.

En el prototipo M-1 la relación entre la potencia en bornes medida y la teórica es de 3,6.

El entrehierro del prototipo M-1 es de 6 mm.

Según el apartado 4.3.2, el prototipo M-2 (motor lineal tubular) absorbe unos 12 kVA, y según la ecuación 2.6.b, tenemos que la potencia teórica en bornes del prototipo M-2 vale unos 2,7 kVA.

En el prototipo M-2 la relación entre la potencia en bornes medida y la teórica es de 4,4.

El entrehierro del prototipo M-2 es de 7 mm.

### **Conclusiones:**

Si el cálculo paramétrico funciona para las máquinas rotativas, también debería funcionar este cálculo paramétrico para las máquinas lineales ¿18?.

.

Las diferencias entre los valores teóricos y los medidos hace suponer que existe un elemento que no se ha tenido en cuenta, y que este elemento perturbador puede ser perfectamente el entrehierro tan grande que poseen las máquinas lineales respecto de las clásicas. Será pues necesario introducir algún coeficiente que cuantifique esta variación observada.

A las ecuaciones del cálculo paramétrico 2.2.b, 2.2.c, 2.6.a, y 2.6.b habría que añadirles un factor de corrección multiplicador, que se puede llamar factor de Massagués ( $M_f = f(?)$ ) pues no se ha encontrado nada similar en la extensa bibliografía consultada. Este factor  $M_f$  debería ser mayor o igual que 1. Para un entrehierro similar a las máquinas rotativas este factor debería ser igual a 1. Para entrehierros mayores este factor  $M_f$  debería ser mayor que 1.  $M_f$  tendrá un límite superior, cuando no exista reacción de inducido.

Para confirmar y determinar la relación entre el factor  $M_f$  y el entrehierro, habría que construir varios prototipos de motores lineales tanto planos como tubulares, con una estructura mecánica que pudiese variar el entrehierro, los conductores y las holguras

o guías mecánicas. Todos ellos y su proporción deben afectar a  $M$ , pero este estudio debe quedar para trabajos posteriores.

Las ecuaciones (2.2.b) y (2.2.c) de la potencia en bornes (absorbida, cuando trabaja como motor) para una máquina de corriente alterna lineal plana quedarían:

$$P_b \approx \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{f}{p} \eta_{A_{cu} A_D} (\hat{B}_{\theta_0}) M \quad (VA) \quad (2.8.a)$$

$$P_b \approx \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{f}{p} \eta_{CL} (q \hat{B}_{\theta_0}) M \quad (VA) \quad (2.8.b)$$

Las ecuaciones (2.6.a) y (2.6.b) de la potencia en bornes para una máquina de corriente alterna lineal tubular serían:

$$P_b \approx 2,22 \frac{f}{p} \eta_{A_{cu} A_D} (\hat{B}_{\theta_0}) M \quad (VA) \quad (2.8.c)$$

$$P_b \approx 2,22 \frac{f}{p} \eta_{DL} (q \hat{B}_{\theta_0}) M \quad (VA) \quad (2.8.d)$$

Este factor que afecta negativamente al rendimiento de las máquinas estudiadas puede venir afectado por el hecho de eliminar los dientes en algunos de ellos. Esto provoca un importante incremento del entrehierro efectivo pues además del grosor de la lámina rotórica, las guías y las holguras mecánicas necesarias hay que incluir el grosor de los conductores y aislantes del estator.

El empleo de métodos numéricos para evaluar los campos magnéticos y el efecto de las variaciones dimensionales de los conductores puede ser de gran utilidad para evaluar el  $M$  con exactitud. Así podrá minimizarse para obtener máquinas más eficaces.