

### 4.3 - Mediciones y ensayos realizados del prototipo de motor tubular bifásico (M-2)

#### 4.3.1 - Mediciones de las impedancias de los devanados del inductor.

Mediciones de los devanados (tabla 8 y 9)

Frecuencia	Devanado 1		Devanado 2	
	R <sub>1</sub> (m?)	L <sub>1</sub> (? H)	R <sub>2</sub> (m?)	L <sub>2</sub> (? H)
50 Hz	4,5	1,64	4,8	1,5
500 Hz	5,0198	1,543	5,68	1,319
Con tubo exterior				
50 Hz	4,7	3,3	4,89	3,325
500 Hz	7,13	2,025	7,0	2,01

Tabla 8: Impedancias de los devanados del inductor del prototipo M-2

Según el apartado 4.2.1.1, la resistencia calculada es de 4,08 m?, por lo que podemos considerar que no hay una desviación significativa con la resistencia medida.

Frecuencia	Devanado 1 y 2 conectados en serie	
	R (m?)	L (? H)
50 Hz	12,103	3,07
500 Hz	13,137	2,67
Con tubo exterior		
50 Hz	12,42	4,18
500 Hz	14,9	3,17

Tabla 9: Impedancias del inductor del prototipo M-2

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

La relación entre L y R es indicativa del coeficiente de calidad del motor y permite comparar diferentes prototipos.

$$G = \frac{L}{R} = \frac{2 \cdot 50 \cdot 4,18 \cdot 10^{-6}}{12,42 \cdot 10^{-3}} = 0,105 \quad (4.3.1.a)$$

Aunque aparentemente es menor que el del prototipo M1 (ecuación (3.4.1.a)), mejora este prototipo al tener menos flujo de dispersión.

#### **4.3.2 - Pruebas de tracción con deslizamiento $S=1$ , del prototipo M-2.**

Los resultados se pueden ver en la tabla 10,11 y 12 y están representados en las figuras 76, 77, 78 y 79.

Para realizar la prueba de tracción hemos utilizado un dinamómetro de carga máxima 100 N con divisiones de 1N de tipo digital.

Para la medición ha sido necesario construir unos anclajes para poder fijar una parte del dinamómetro. El otro extremo del dinamómetro se ha sujetado al inducido del prototipo M-2 (fotos 14 y 15).

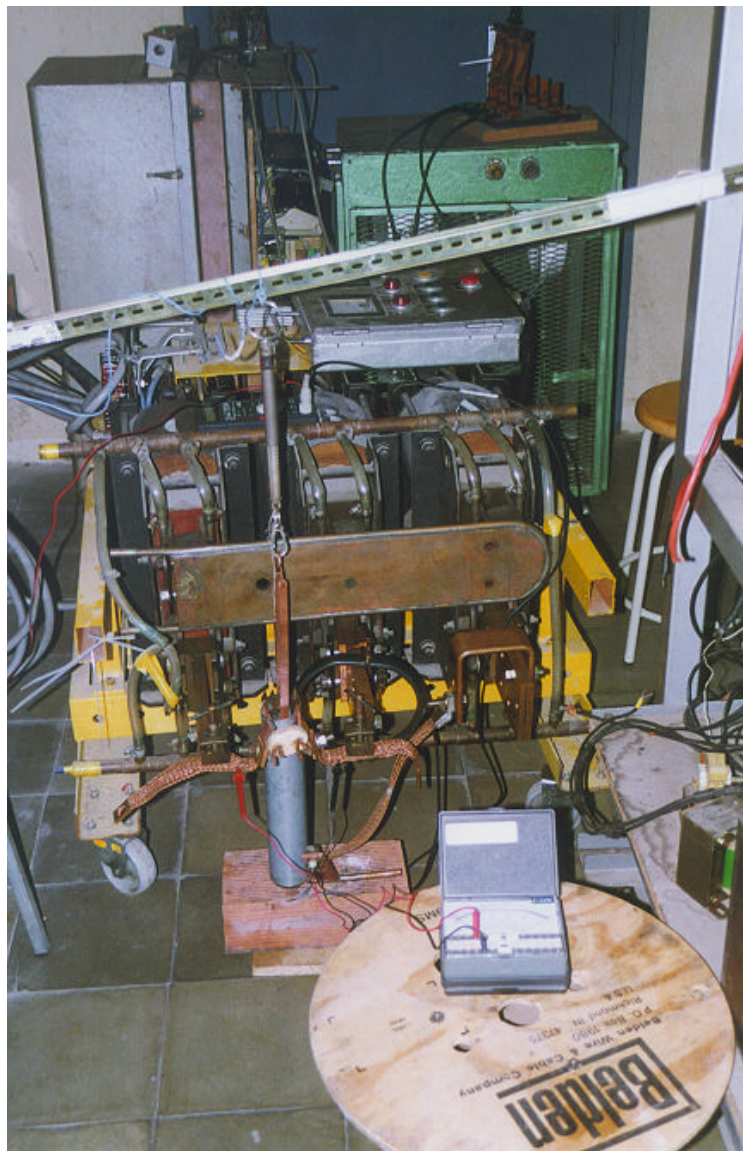


Foto. 14 : Vista general del ensayo de tracción del prototipo M-2

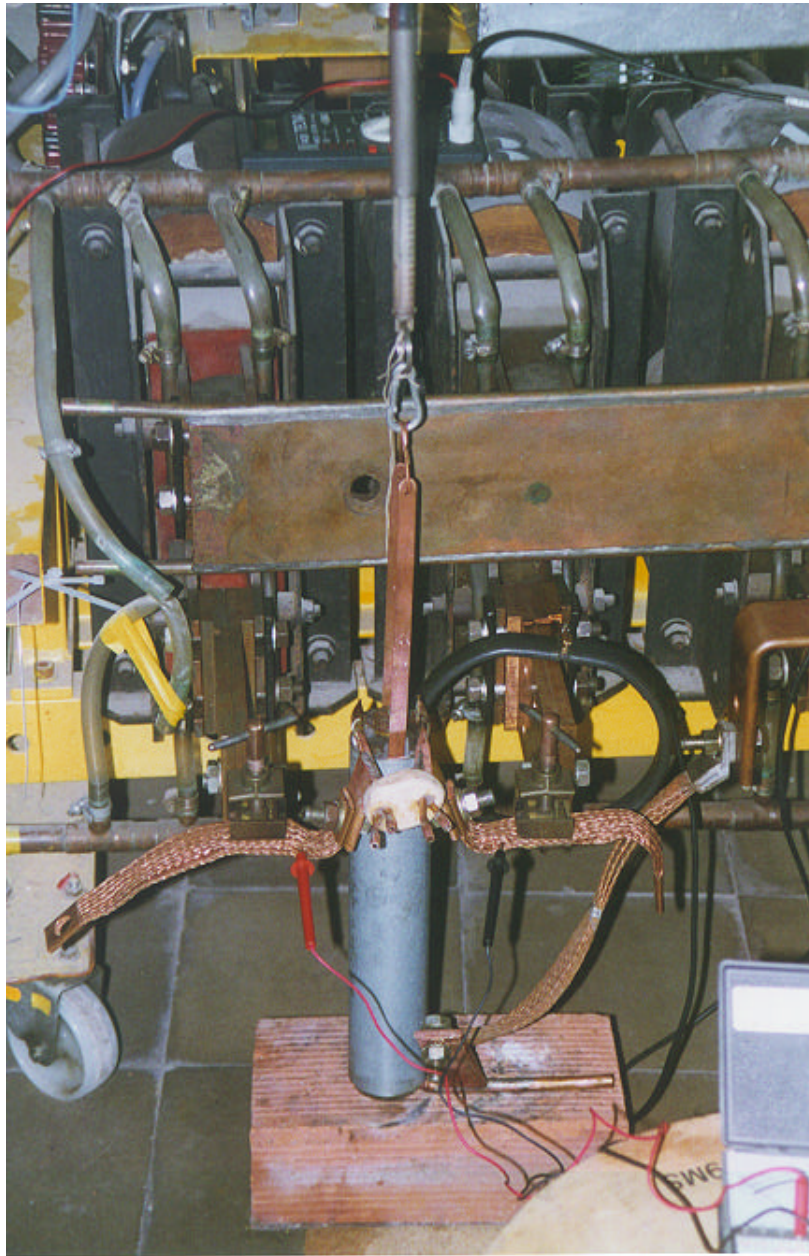


Foto. 15 : Vista del ensayo de tracción del prototipo M-2 conectado al TS.

Para la prueba se ha utilizado un tubo de aluminio como inducido sin refrigerar el inductor.

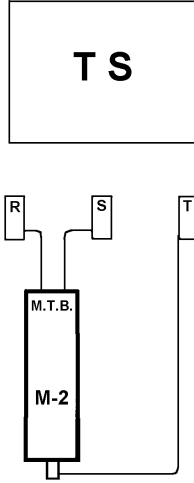


Fig.75 : Conexiones del prototipo M-2 con el TS.

La conexión eléctrica es entre las fases RST estando las fases RT a 120°.

Ensayos realizados en régimen adiabático		
$I_s$ (A)	$V_{RT}$ (V)	F (N)
350	0,017	1,47
390	0,015	2,45
406	4	2,45
500	2,2	4,41
511	1,8	5,4
550	5,8	5,4
590	5,4	6,37
640	6,5	8,34
695	8,5	9,32
734	7,2	11,28
800	6,8	13,24
852	7,2	14,22
900	9,4	14,71
1010	3,6 (5,8 en vacío)	17,16

Tabla 10: Valores de la fuerza de tracción del prototipo M-2, en función de la tensión aplicada y corriente absorbida.

La corriente que circula por los devanados, lo hace durante el tiempo mínimo, para efectuar las mediciones de fuerza con un dinamómetro y medir la corriente que circula por una de sus dos fases. Las mediciones de la tensión se han realizado con

un polímetro analógico, clase 0,5, el cual debido al poco tiempo para las mediciones, no es consecuente con las pruebas realizadas, sobre todo en la última prueba. Por ello, decidimos en la última prueba medir la tensión en vacío durante el tiempo necesario para asegurarnos, una medición correcta.

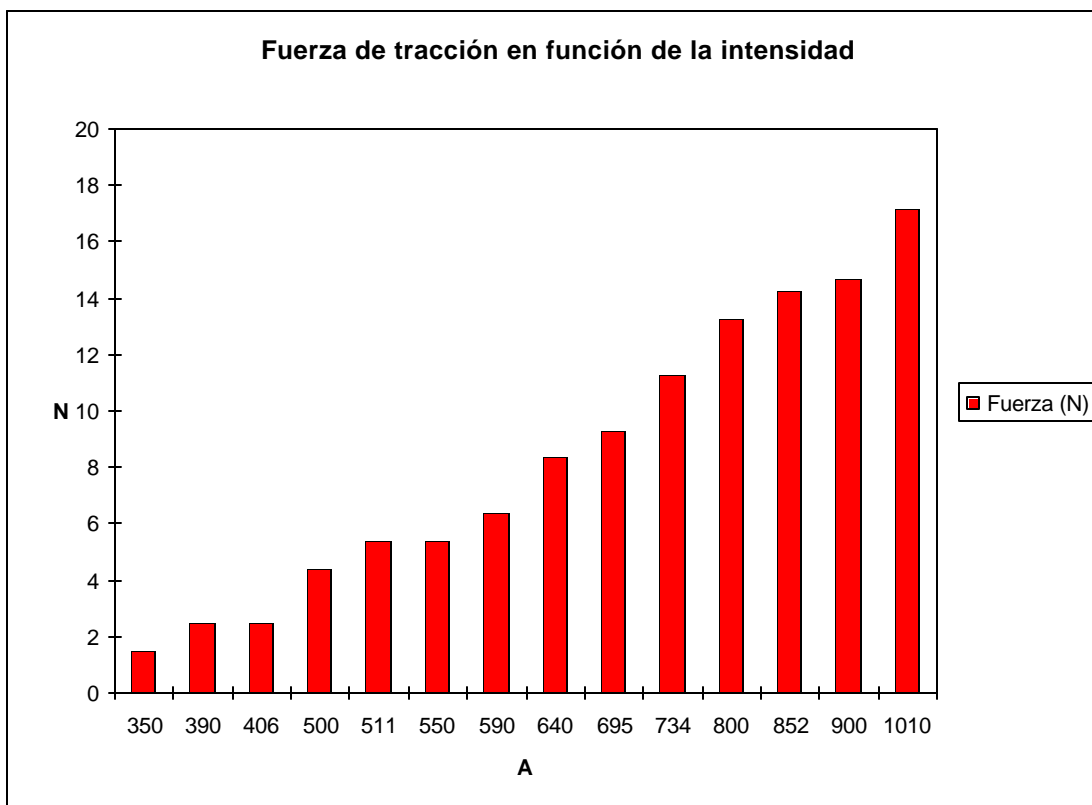


Fig. 76: Relación de la fuerza de tracción en función de la intensidad, del prototipo M-2.

En la gráfica no se puede apreciar de forma correcta la relación corriente-fuerza, debido a que la distancia en el eje de la corriente respecto al origen no está representada de forma proporcional.

La relación corriente-fuerza de esta gráfica se puede considerar que es casi lineal con la salvedad de un par de puntos.

Después, de realizar las pruebas de tracción del prototipo M-2 con un inducido de aluminio, este se ha sustituido por agua saturada con sal para comprobar si ejercía algún tipo de fuerza sobre el agua, dando resultados negativos.

Pruebas de tracción del prototipo M-2 con agua saturada de sal como inducido:

Agua saturada de sal			
$I_R$ (A)	$I_T$ (A)	$U_{RS}$ (V)	$U_{ST}$ (V)
1522	984	1.4	0.3
1705	970	1.3	1.7
1910	1207	2.8	2
2173	1350	2.5	1.9
2371	1514	2.2	2.2
2667	1646	2.6	2.4
2898	1844	3.7	2.2
2996	1910	3.3	3.7
3029	1976	3.2	3.9

Tabla 11: Valores de la corriente absorbida del prototipo M-2 en función de la tensión aplicada con agua saturada de sal como inducido.

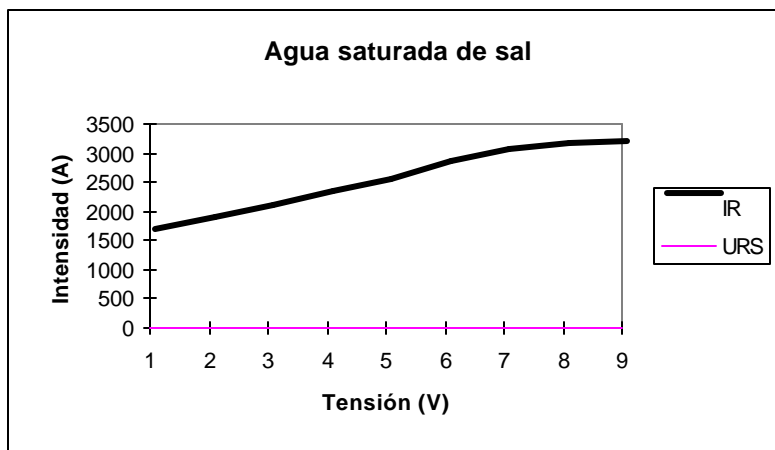


Fig.77 : Relación de la intensidad en función de la tensión con un inducido líquido (agua saturada de sal).

Se comprueba que no existe movimiento en el agua debido al campo magnético, cosa que era de esperar después de los estudios realizados en el prototipo M-1.

Después de realizar las pruebas de tracción del prototipo M-2 con un inducido de agua saturada de sal, se ha sustituido por agua corriente para comprobar si el comportamiento era igual que con agua saturada de sal.

Pruebas de tracción del prototipo M-2 con agua corriente como inducido:

Agua corriente			
$I_R$ (A)	$I_T$ (A)	$U_{RT}$ (V)	$U_{ST}$ (V)
1128	747	1.2	1.5
1417	944	2.2	0.8
1679	1089	3	2.5
1778	1152	3.4	3
2107	1383	3.7	3.1
2338	1482	4.7	3.3
2535	1613	4.5	4.8
2865	1778	4.4	3.8
2931	1877	4.3	4.2

Tabla 12: Valores de la corriente absorbida del prototipo M-2 en función de la tensión aplicada con agua corriente como inducido.

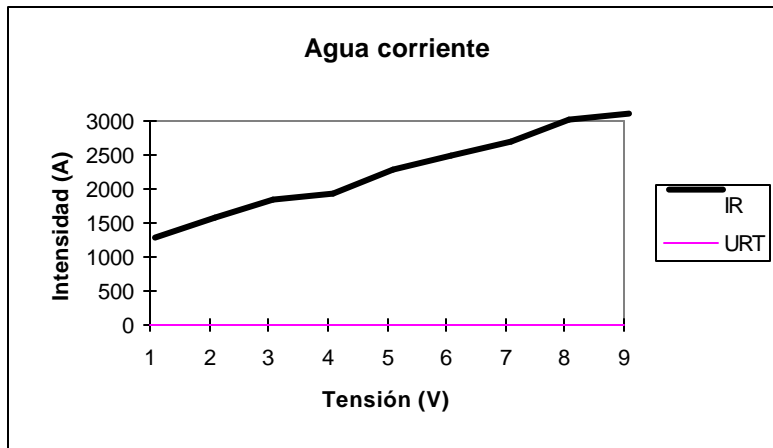


Fig.78 : Relación de la intensidad en función de la tensión con un inducido líquido (agua corriente).



**Consumo en función del tipo de inducido**

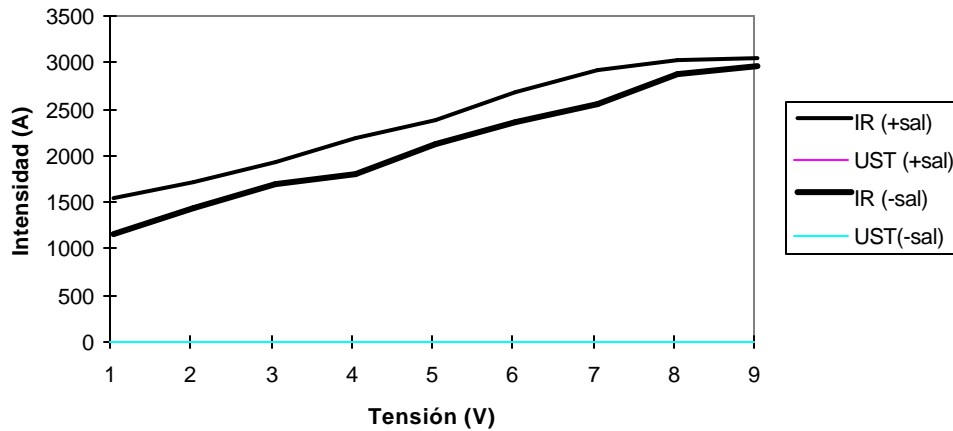


Fig.79 : Contraste del consumo de intensidad en función del tipo de inducido líquido (agua saturada con sal y agua corriente ).

Las mediciones se han realizado con un kiloamperímetro con sonda Rogowsky “TECNA 1430 weld Tester True RMS” y un Voltímetro (polímetro) Tes 3012 analógico.

Las medidas se han tomado en bornes del motor.

La corriente que hacíamos circular por los devanados lo hacía durante el tiempo mínimo para hacer las mediciones de la corriente. Las mediciones de la tensión se han realizado con un polímetro analógico. Debido al poco tiempo disponible para las mediciones, éstas no se corresponden con las pruebas realizadas.

Se constata que las tensiones medidas en la prueba con agua corriente son superiores a las tensiones medidas en la prueba con agua saturada de sal.

Se podría decir que en el agua saturada de sal la fuerza contraelectromotriz es superior que en el agua corriente.

De todas maneras, debido al escaso tiempo al que sometemos el prototipo M-2 a la prueba, se debería utilizar un equipo de adquisición de datos, un equipo de Labview, o un osciloscopio con memoria, igual al que hemos utilizado en el prototipo M-1.



### 4.3.3 - Fuerza de tracción del motor lineal M-2

En el interior del motor lineal tubular tenemos 1 conductor por ranura y teóricamente 0,162 T, siendo la longitud afectada de 0,24 m.

Sustituyendo los siguientes valores en la fórmula de la carga lineal:

$$2p = 24$$

$$m = 1$$

$$\eta_{pf} = 0,5$$

$$Z_n = 1$$

$$I_f = 1010 \text{ A}$$

$$L = 0,24 \text{ m}$$

$$q = 101000 \text{ A/m}$$

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

$$D = 0,047 \text{ m}$$

$$L = 0,24 \text{ m}$$

$$q = 101000 \text{ A/m}$$

$$B = 0,162$$

Fuerza ficticia en bornes:

$$F_b = 41 \text{ N}$$

Teóricamente el factor de potencia vale 0,5

Entonces la fuerza ficticia en N valdría:

$$F_{b\text{-total}} \cdot \cos\phi = 20,5 \text{ N}$$

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 1m/s.

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

De esta potencia en bornes, una parte es degradada en calor por efecto Joule en la resistencia de los devanados primario y secundario y una parte en el hierro del estator. Debido a que el motor lineal tubular es asíncrono, y el recorrido del inducido está limitado a 2 cm, la velocidad de sincronismo no será alcanzada nunca en este prototipo.

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

Según el apartado 4.3.2 a 5,8 V y consumiendo 1010 A , la fuerza medida con el inductor frenado (velocidad = 0) es de 17,16 N.

## Resumen

Prototipo	Fuerza de tracción medida (N) (v=0)	Fuerza ficticia (N)
M-2	17,16	20,5

Tabla 13: Resumen de fuerzas en el prototipo M-2

### 4.3.4 - Tiempo y fuerza de aceleración del prototipo M-2

En el prototipo M-2, la masa que debe acelerarse es el inducido, que es un tubo de aluminio con un diámetro exterior de 50 mm y un diámetro interior de 47 mm, siendo su longitud de 240 mm. La densidad específica del aluminio es de 2,7 kg/dm<sup>3</sup>.

Con estas dimensiones del tubo de aluminio se obtiene una masa de 0,15 Kg.

La masa que debe acelerarse hasta la velocidad de régimen es de 0,15 Kg. La velocidad de sincronismo es de 1 m/s, desconociéndose el deslizamiento real por tener limitado el movimiento del inducido a tan sólo 2 cm.

Según el apartado 4.3.2, a 5,8 V y consumiendo 1010 A , la fuerza medida con el inductor frenado (velocidad = 0) es de 17,16N

$$F_a \approx m \cdot a \quad (2.9.a)$$

$F_a$  : N  
 $m$  : kg  
 $a$  : m/s<sup>2</sup>

$$a \approx \frac{F_a}{m} \approx \frac{17,16}{0,15} \approx 114,4 \text{ m/s}^2$$

Es decir 11 veces la gravedad.

Si en el momento de arranque hemos medido una fuerza de 17,16 N, podemos considerar que el tiempo medio para pasar la máquina de 0 a 1 m/s es de:

$$T \approx \frac{V}{a} \approx \frac{1 \text{ m/s}}{114,4 \text{ m/s}^2} \approx 0,0087 \text{ s}$$

T: s  
V: m/s  
a: m/s<sup>2</sup>

A 50 Hz (período de 0,02 s) el prototipo M-2 tardaría menos de 1 período en ponerse a velocidad de régimen si no tuviese limitado el desplazamiento.

#### **4.3.5 - Observaciones**

No se puede realizar la característica real fuerza-deslizamiento del motor lineal tubular ya que el diseño lo impide. Se precisaría que el inducido fuese lo suficientemente largo como para ir cargando el inducido con pesos e ir comprobando su velocidad, durante un mínimo de tiempo para que el motor se estabilice.

Si hubiésemos ido sobrados económicamente todos los ajustes mecánicos habrían sido optimizados y consecuentemente el motor habría sido más eficaz.

No se debe perder de vista que se trataba de un prototipo de exploración previa de una tecnología constructiva y de sus posibilidades.

#### **4.3.6 - Conclusiones**

La fuente de corriente para alimentar el prototipo M-2 se ha comportado correctamente ya que el motor funciona. Cabe tener en cuenta que la fuente es trifásica y que, por tanto, los vectores de corriente no están desfasados 90°. Aparece un 3<sup>er</sup> armónico muy importante que distorsiona los resultados. Una adecuada modificación de la fuente de alimentación con primario en conexión SCOTT podría resolver este aspecto. Aunque se está trabajando en ello, no estaba disponible durante la experimentación.

El acoplamiento entre el inductor y el inducido no es bueno debido principalmente al gran entrehierro que se dispone (7 mm).

Se dispuso 1 conductor plano de 1mm de grueso por 8 mm de ancho por ranura teórica, utilizando una densidad de corriente del orden de 125 A/mm<sup>2</sup> para comprobar la viabilidad de utilizar superconductores en las máquinas lineales, obteniéndose resultados favorables.

El diseño de dispositivos superconductores para corriente alterna no es trivial y requiere minimizar el campo en que trabaja el superconductor. Está claro que los superconductores tienen pérdidas, la cuestión es si vale la pena utilizarlos en

corriente alterna. Esta cuestión es puramente cuantitativa y, de hecho introduce un límite para la frecuencia de trabajo. Afortunadamente, a 50 o 60Hz funcionan de forma aceptable [47], [48].

#### **4.3.7 - Propuestas de mejora del prototipo M-2**

Actualmente tenemos el inductor con un diámetro de 40 mm sin dientes con objeto de abaratar costes y disminuir el tiempo de construcción del prototipo. Esto hace que el entrehierro sea más grande de lo necesario.

Es evidente que a 50 Hz habría que dotar al inductor de dientes para disminuir el entrehierro, lo que en nuestro caso supondría suponer pasar de 7mm de entrehierro a 4 mm. Esto significaría mecanizar una barra de hierro de 46 mm de diámetro.

Se dispuso 1 conductor plano de 1mm de grueso por 8 mm de ancho por ranura teórica. El conductor plano está situado paralelamente al eje del inductor, lo que implica una ranura tan ancha como el conductor como mínimo. Si el conductor se dispusiera de forma perpendicular al eje, se podría reducir el paso de diente aunque complicaríamos mucho la ejecución del devanado, si no se cambia el conductor plano por un mazo de conductores redondos.

El inducido utilizado tiene un diámetro interior de 47 mm y un diámetro exterior de 50mm. La holgura de 1 mm entre la cara externa del inductor y la interna del inducido es correcta desde el punto de vista mecánico.

La holgura de 4 mm entre la cara externa del inducido y la interna del tubo de hierro externo para facilitar el cierre de las líneas de fuerza es excesiva y debería reducirse a 1 mm.