

3.4 - Mediciones y ensayos realizados del prototipo de motor lineal plano bilateral trifásico (M-1)

3.4.1 - Mediciones de las impedancias de los devanados del inductor

Con un medidor de impedancias MZ 705, (tabla 3 y 4) :

Frecuencia	R (Ω)	L (mH)	Z (Ω)	φ
100 Hz	3,22	9,42	6,76	61,4°
1 KHz	4,1	9,41	59,25	85,9°
10KHz	7	9,46	597,5	84,6°

Tabla 3: Impedancias del inductor del prototipo M-1, sin el inducido.

Frecuencia	R (Ω)	L (mH)	Z (Ω)	φ
100 Hz	3,9	7,84	6,34	51,6°
1 KHz	6	6,7	42,93	81,9°
10KHz	5	6,3	402,1	83,7°

Tabla 4: Impedancias del inductor del prototipo M-1, con el inducido.

Se puede observar que existe una disminución de la inductancia con el inducido demostrando que existe reacción de inducido.

Con un polímetro digital la resistencia de las tres fases es igual a 3,4 Ω .

Según apartado 3.2.1.1 la resistencia calculada para corriente continua era de 2,95 Ω , por lo que existe una desviación del 13% respecto a la resistencia medida.

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

$$G = \frac{L}{R} = \frac{2 \cdot 50 \cdot 7,84 \cdot 10^{-3}}{3,9} = 0,63 \quad (3.4.1.a)$$

En este caso no puede determinarse que proporción se debe al flujo de dispersión en las ranuras, aunque debido a la forma, la dispersión ha de ser muy fuerte.

3.4.2 - Pruebas de tracción con deslizamiento s=1.

Los resultados se pueden ver en la tabla 7 y están representados en las figuras 45 y 46.

Para realizar la prueba de tracción hemos utilizado primero un dinamómetro de carga máxima 500N con divisiones 1N de tipo digital, modelo DFG-100 de la marca CHATILLON cedido por SEAT para tal medición.

Posteriormente, y debido a que la fuerza medida superaba las previsiones, el “Departament d’Enginyeria Electrónica, Elèctrica i Automàtica” de la URV, adquirió un dinamómetro de 981N de fondo de escala para poder proseguir con las mediciones.

Se repitieron las mediciones y dieron resultados similares.

Para la medición ha sido necesario construir unos anclajes para poder fijar una parte del dinamómetro, habiéndose sujetado el otro extremo del dinamómetro al motor lineal.

A medida que se le aplicaba más tensión, el motor lineal plano bilateral absorbía más corriente con el consiguiente calentamiento del motor. Como precaución, para no quemar el devanado, se dejaba enfriar el motor cuando fuera necesario. Debido a estos tiempos muertos entre ensayos el motor se enfriaba y la resistencia del devanado también disminuía, ocasionando que en el primer ensayo la fuerza leída fuese bastante superior a la anterior.

Prueba de tracción estática del motor lineal plano			
Tensión en vacío V_{RS} (V)	Tensión en carga V_{RS} (V)	Intensidad (A)	Fuerza (N)
40	30		19.62
70	60	13	49.05
80	70		63.765
90	80		86.328
100	90	18	104.967
110	98		129.5
120	107	22	149.1
130	115		171.67
140	125	25	201.1
150	135		227.6 (*1)
160	150	28	250.1 (*2)
170	155		309
180	166	33	318.82
190	178		353.16
200	190	37	382.6
210	200		457.14 (*3)
220	210	43	510.1
230	220		539.55
240	230		637.65

(*1) Se ha puesto un peso de 58.86 N encima del motor lineal como contrapeso

(*2) Se ha puesto un peso de 107.91 N encima del motor lineal como contrapeso y además se ha dejado enfriar el motor durante 15 minutos.

(*3) Límite de la medición del dinamómetro disponible (490.5 N)

Tabla 5: Valores de la fuerza de tracción del prototipo M-1 en función de la tensión aplicada y corriente absorbida

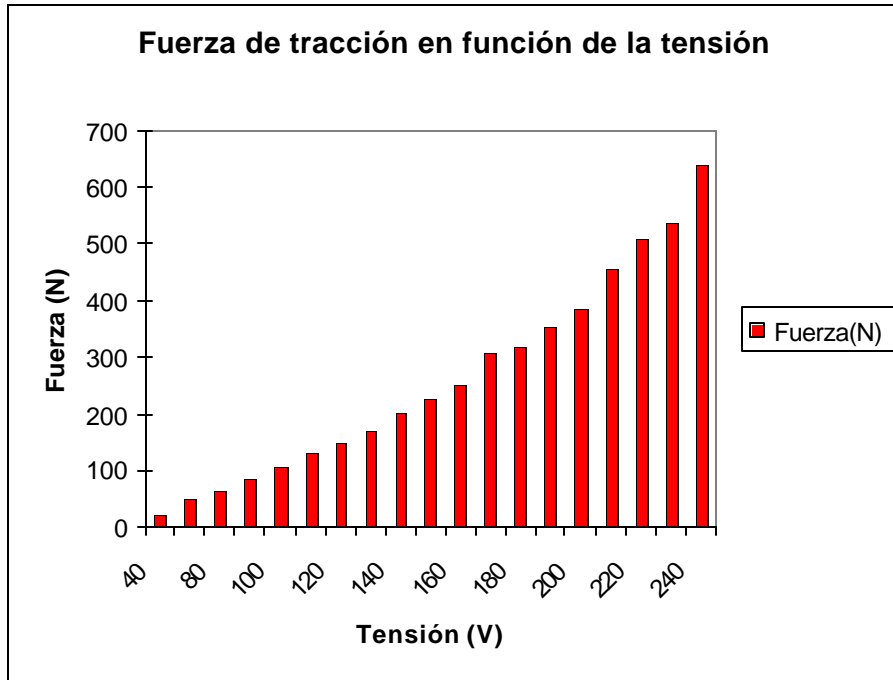


Fig. 45: Relación de la fuerza de tracción en función de la tensión

La fuerza de tracción medida es proporcional al cuadrado de la tensión, aunque las elevadas pérdidas lo enmascaren hasta los 150 V.

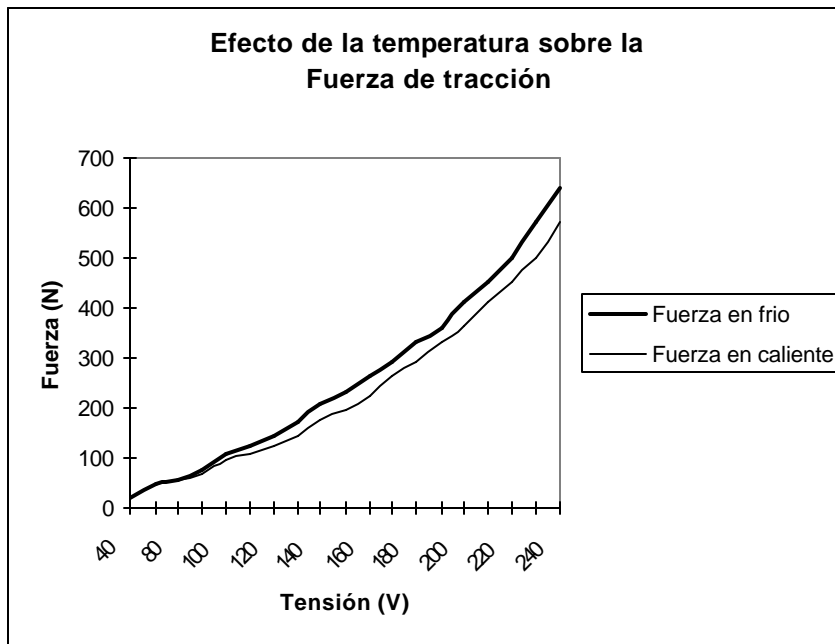


Fig. 46: Efecto de la temperatura sobre la fuerza de tracción.

La fuerza de tracción del prototipo M-1 medida varia en función de la temperatura alcanzada en los devanados.

En caliente la resistencia de los devanados aumenta produciendo una caída de tensión superior y una circulación de corriente menor traduciéndose en una fuerza útil menor.

3.4.3 - Pruebas dinámicas

Los resultados se pueden ver en la tabla 6 y están representados en la figura 47.

Se ha medido el tiempo que tarda el prototipo en recorrer una distancia prefijada, alimentando el motor lineal a diferentes tensiones y a frecuencia constante (50 Hz).

El transitorio de arranque se incluye dentro de la medición.

Tensión (V)	Intensidad (A)	distancia (m)	tiempo (s)	velocidad media (m/s)	Deslizamiento medio
70	13	8	4	2	0,333
100	18	8	3.5	2.28	0,24
120	22	8	3.5	2.28	0,24
140	25	8	3.1	2.58	0,14
160	28	8	3	2.66	0,1133
180	33	8	3	2.66	0,1133
200	37	8	3	2.66	0,1133
220	41	8	3	2.66	0,1133

Tabla 6: Velocidad del prototipo M-1, en función de la tensión aplicada y corriente absorbida

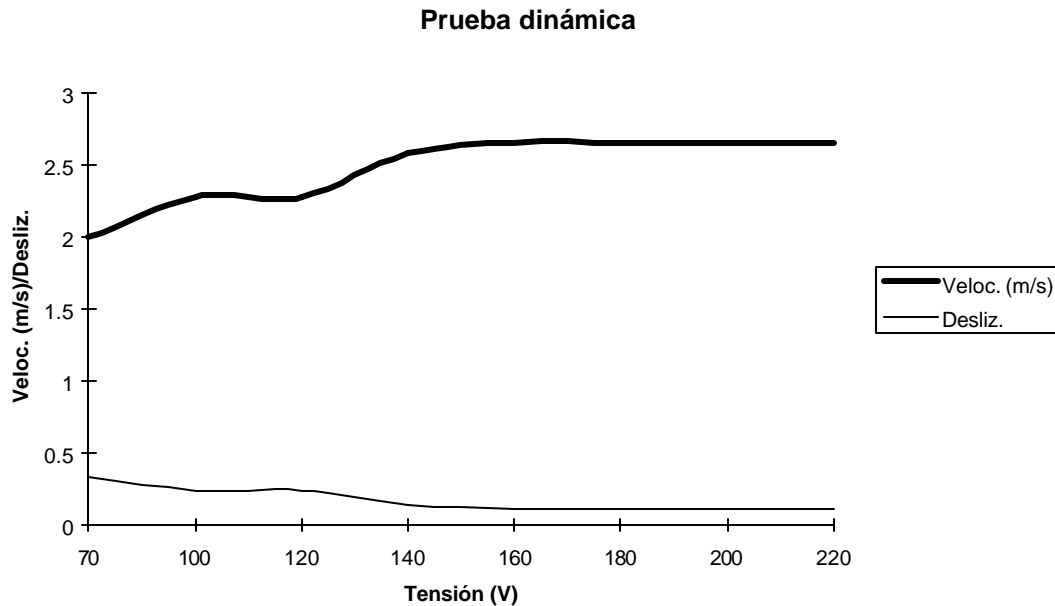


Fig. 47: Velocidad - deslizamiento del motor lineal M-1 en función de la tensión.

A partir de 150 V aparece un cambio de curvatura al igual que ocurre en la gráfica de la fuerza de tracción en función de la tensión.

Se ha utilizado instrumentación analógica para medir el consumo, el $\cos \phi$ y la tensión del motor lineal y se ha observado que en el momento del arranque el factor de potencia del motor lineal plano es aparentemente capacitivo. A medida que aumenta la velocidad (velocidad casi instantánea) el factor de potencia pasa de capacitivo a inductivo.

Cuando se para el motor lineal los instrumentos vatimétricos pasan de un factor de potencia inductivo a capacitivo.

Debido a las variaciones del factor de potencia decidimos realizar otras medidas con instrumentación digital.

El cable de alimentación está conectado directamente al motor y arrastrado por éste. Debido al espacio y textura del suelo disponible, un plegado cuidadoso junto al raíl permitía este arrastre.

El número limitado de maniobras realizadas ha permitido este sistema de alimentación. Aparte de su sencillez, es mucho mejor para la toma de medidas eléctricas al evitarse los falsos contactos de los sistemas de alimentación deslizantes.

3.4.4 - Mediciones de parámetros eléctricos del motor lineal bilateral M-1

Realizados en colaboración con Hugo Valderrama Blavi profesor TEU de la ETSE de la URV y Sergi Garriga Alcántara profesor Asociado de la ETSE de la URV.

Instrumentación utilizada:

Osciloscopio: Tektronix, TDS 754C, Color four CHannel Digitizing Oscilloscope with Insta Vu Acquisition, 500 MHz, 2 GS/s.

Sonda de corriente: Tektronix, AM 503B, Current probe Amplifier

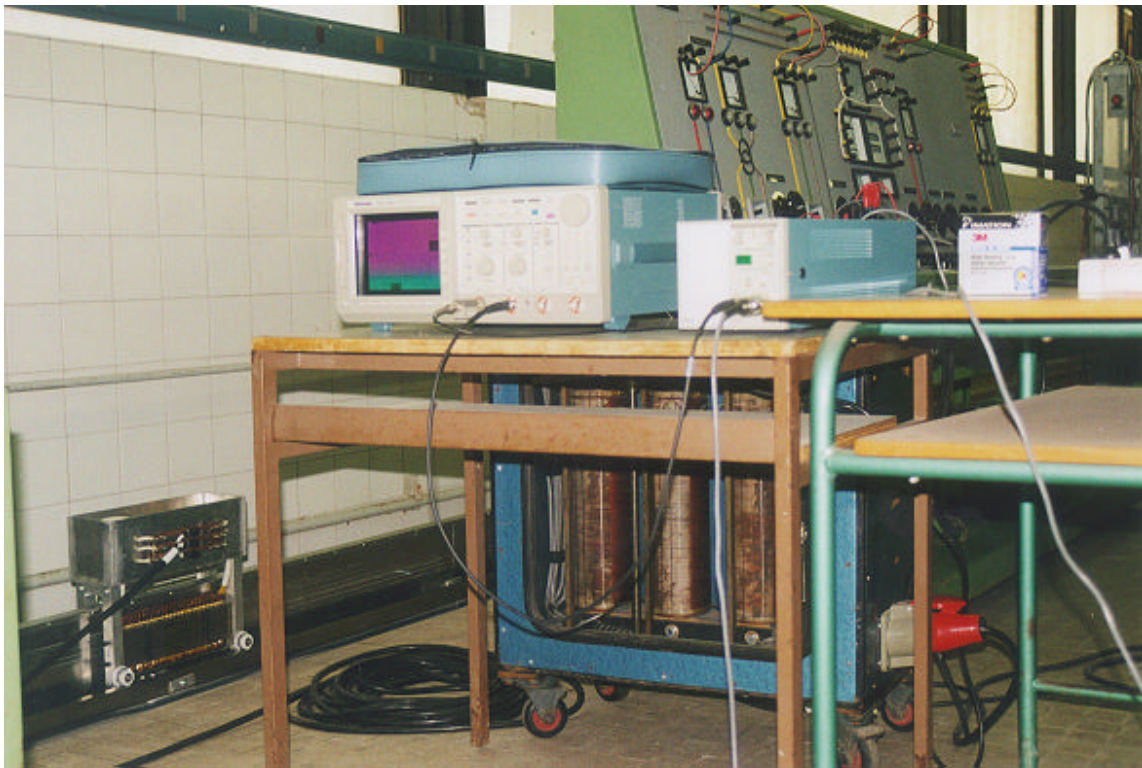


Foto. 8 : Equipo de medida Tektronix, y prototipo M-1.

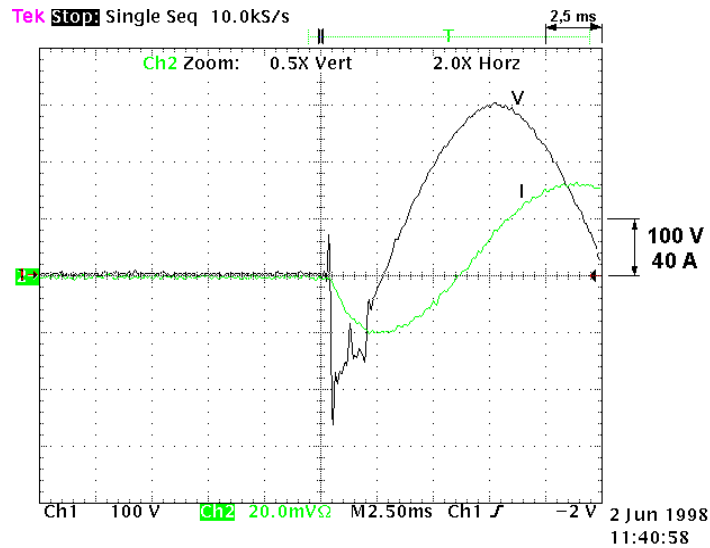


Fig. 48: Señal de tensión y corriente en el arranque en el primer ciclo.

En la figura 48 se puede apreciar que en el momento que apretamos el botón de marcha aparece una caída de tensión transitoria.

Cada división representa 100 V y 40 A.

Se han tomado 10.000 lecturas por segundo para trazar las señales.

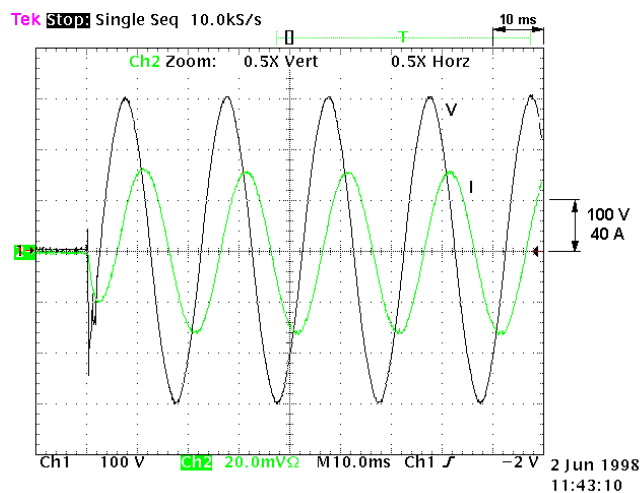


Fig. 49: Señal de tensión y corriente durante los primeros ciclos del arranque.

En la figura 49 se puede apreciar que la amplitud de las señales de tensión y corriente permanecen constantes durante los primeros ciclos del arranque.

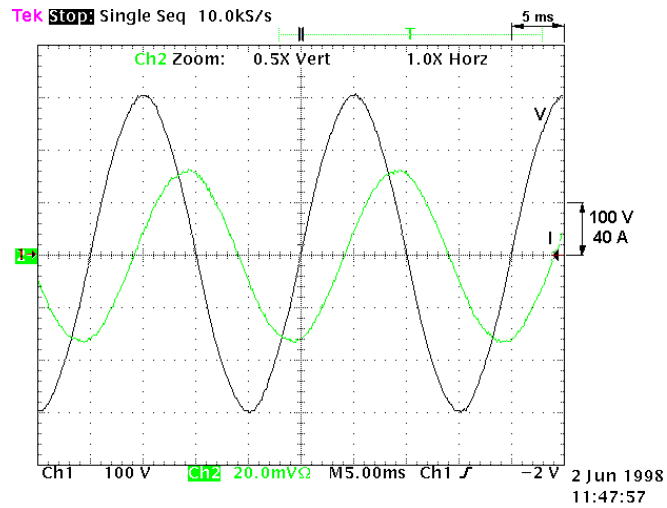


Fig. 50: Señal de tensión y corriente a los dos segundos del arranque.

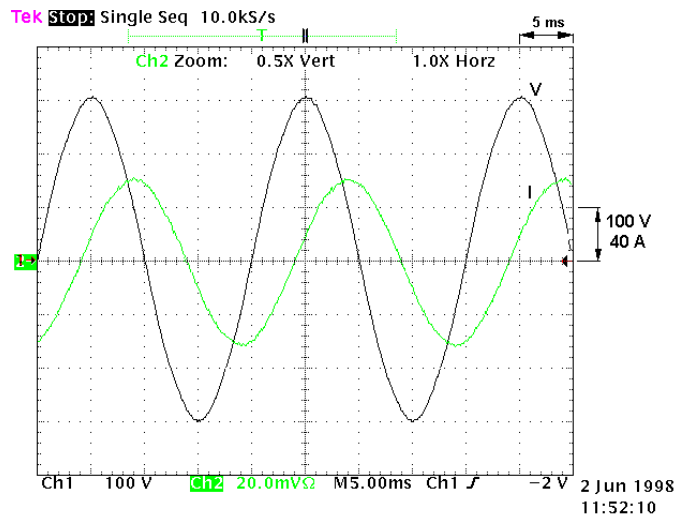


Fig. 51: Señal de tensión y corriente a los cuatro segundos del arranque.

Tanto en la figura 50 como en la 51 vemos que la amplitud de las señales de tensión y corriente permanecen aparentemente constantes.

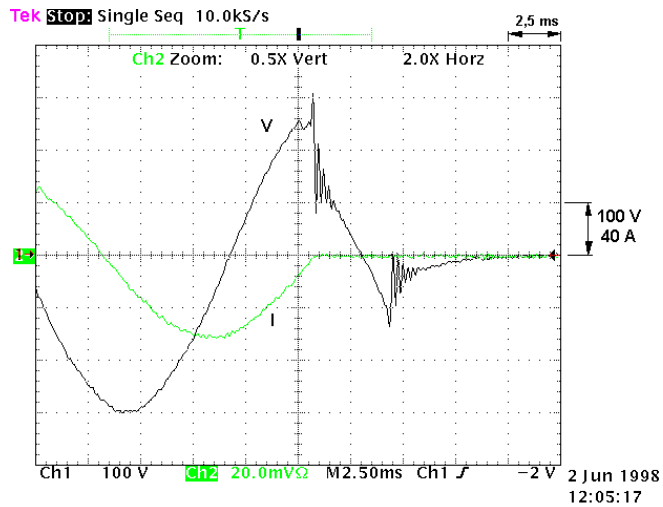


Fig. 52: Señal de tensión y corriente en la parada, último ciclo.

En la figura 52 se puede apreciar que en el momento que apretamos el botón de parada, la señal de tensión no desaparece de forma instantánea.

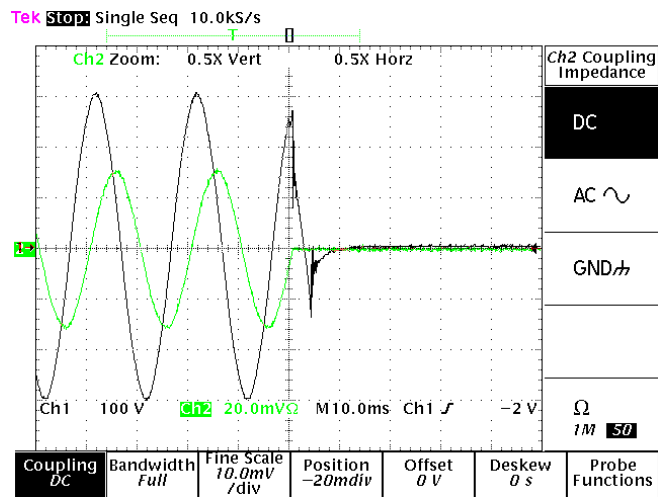


Fig. 53: Señal de tensión y corriente en la parada, últimos tres ciclos.

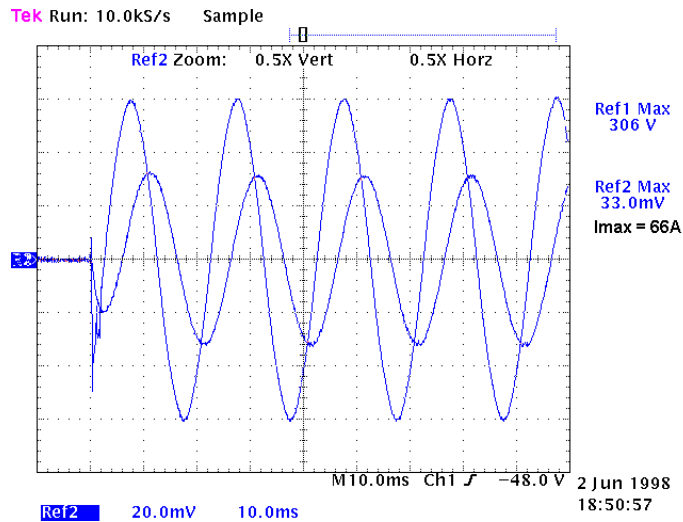


Fig. 54: Señal de tensión y corriente en el arranque.

De las diferentes señales tomadas durante 9 segundos se puede decir que la tensión y la corriente permanecen aparentemente constantes, por lo que midiendo las divisiones tendremos los valores de tensión y corriente:

$$\text{Tensión entre fases} = 306\text{V}/\sqrt{2} = \mathbf{216,4\text{ V}}$$

$$\text{Corriente absorbida} = 66\text{A}/\sqrt{2} = \mathbf{46,7\text{ A}}$$

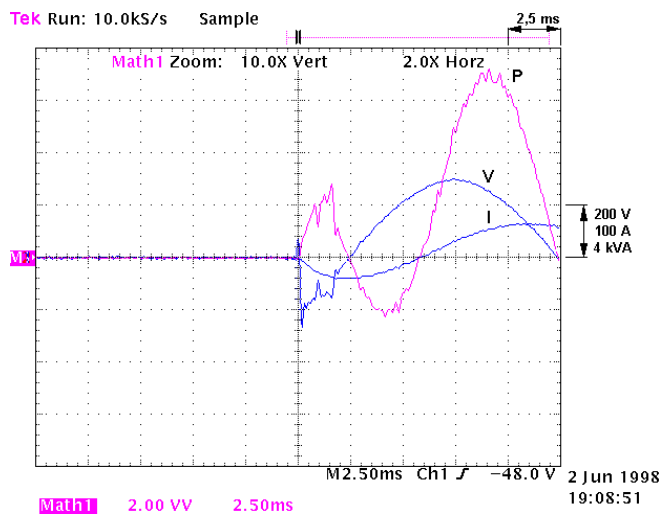


Fig. 55: Señal de tensión, corriente y potencia en el arranque.

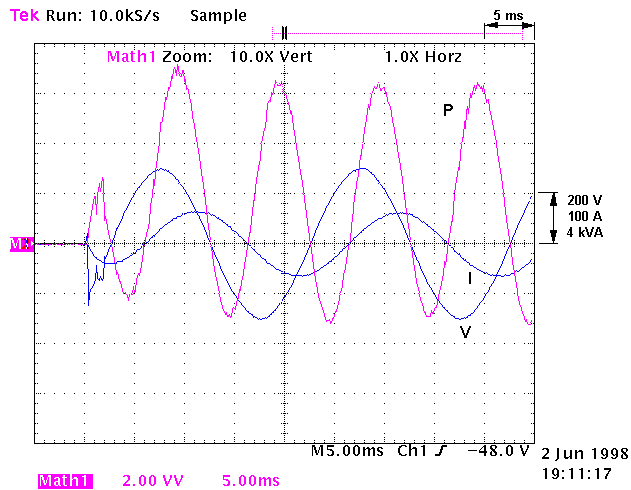


Fig. 56: Señal de tensión, corriente y potencia durante los primeros ciclos del arranque.

En la figura 56 se puede apreciar que la potencia absorbida por el motor lineal M-1, durante los primeros ciclos no es constante. Esto nos demuestra que hay un período de arranque que nos pasaba desapercibido cuando sólo medíamos las señales de tensión y corriente.

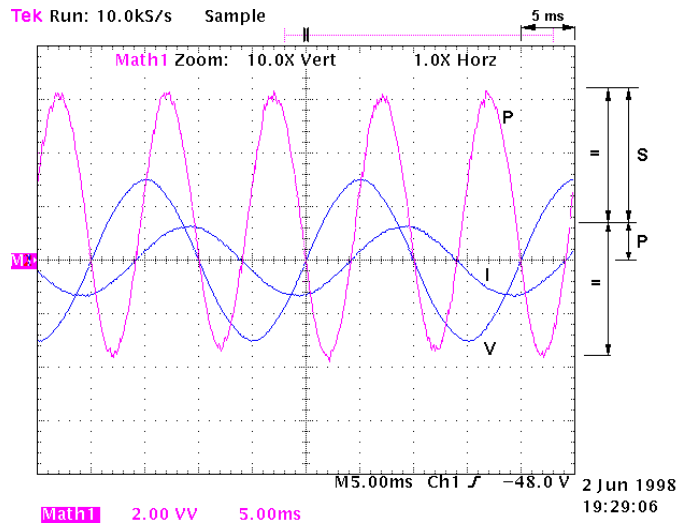


Fig. 57: Señal de tensión, corriente y potencia, a los dos segundos del arranque.

En la fig.57, podemos observar que la excentricidad de la señal de potencia nos indica la potencia activa.

Según las divisiones de la figura 57 tenemos que:

Valor máximo Potencia instantánea = 6,2 VV

Valor mínimo Potencia instantánea = -3,2 VV

Valor pico a pico Potencia instantánea = 9,4 VV

$S = 9,4 / 2 = 4,7 \text{ VV}$ ($9,4 \cdot \sqrt{3} = \mathbf{16,28 \text{ kVA}}$)

$P = 1,5 \text{ VV}$ ($3 \cdot \sqrt{3} = \mathbf{5,196 \text{ kW}}$)

$P = S \cos ?$

$\cos ? = 0,319$

$Q ? \sqrt{S^2 - P^2} ? \sqrt{16,28^2 - 5,196^2} ? 15,428 \text{ kVAr}$

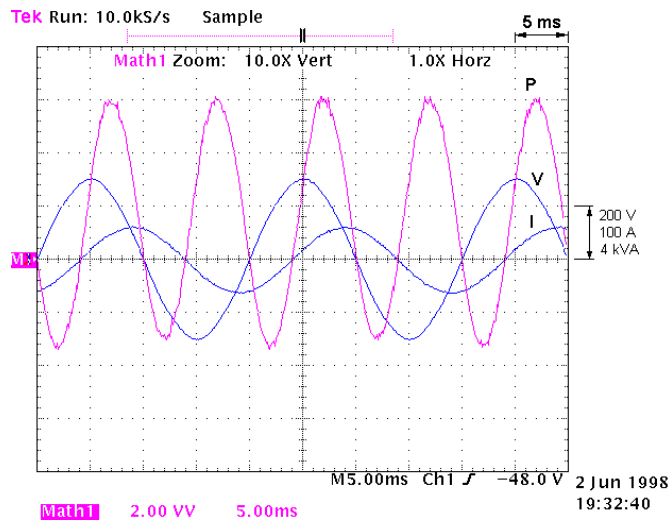


Fig. 58: Señal de tensión, corriente y potencia, a los cuatro segundos del arranque.

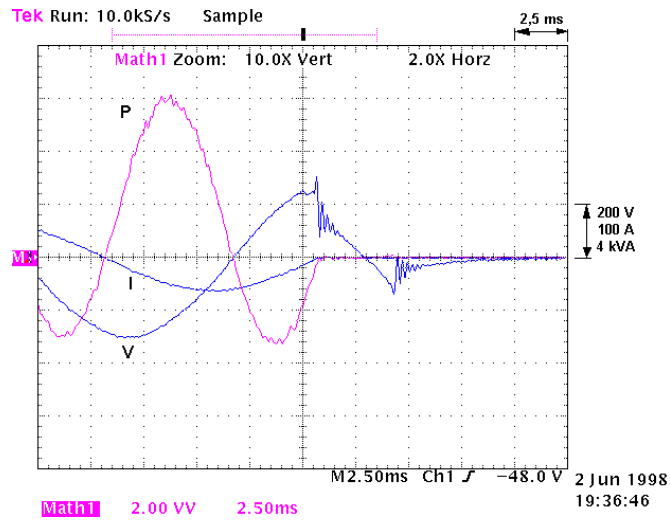


Fig. 59: Señal de tensión, corriente y potencia en la parada en el último ciclo.

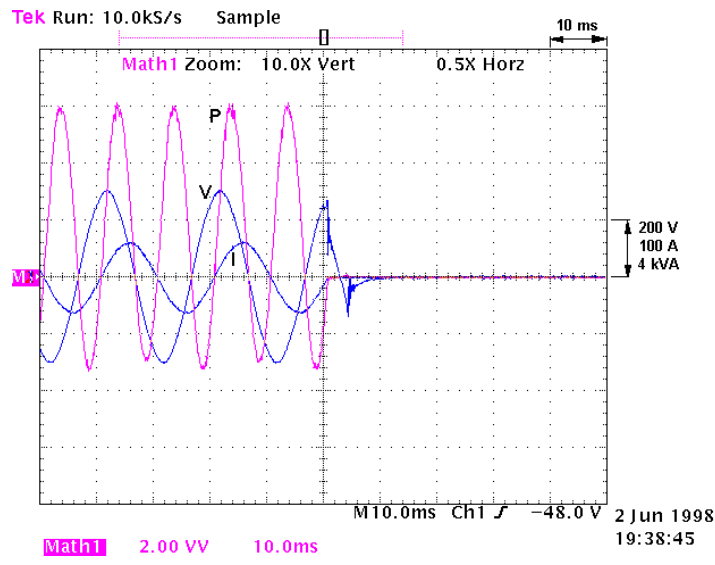


Fig. 60: Señal de tensión, corriente y potencia en la parada en los cinco últimos ciclos.

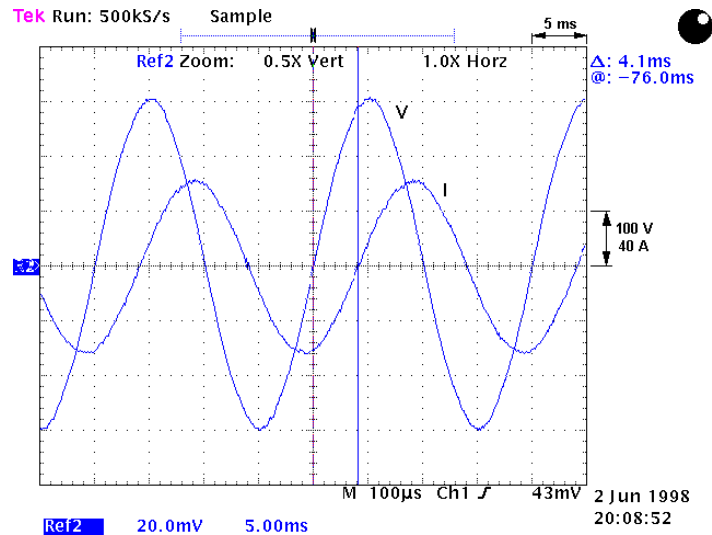


Fig. 61: Desfase de la señal de tensión y corriente.

En la figura 61 hemos medido directamente el desfase en el tiempo entre la señal de tensión y de corriente.

Desfase medido entre U y I $\sim 4,1$ ms (? $\sim 73,8^\circ$)
 $\cos ? = 0,2789$

Resumen de mediciones:

Tensión entre fases	:	216,4 V
Corriente absorbida	:	46,7 A
Potencia aparente	:	16,28 kVA
Potencia activa	:	5,196 kW
Potencia reactiva	:	15,428 kVAr
Factor de potencia	:	0,2789

Como podemos comprobar la hipótesis adoptada en el apartado 3.1 de factor de potencia 0,5 no es correcta.

3.4.5- Determinación de la inducción en el entrehierro, cuando el motor M-1 está alimentado a 220V y a 50 Hz

Mediante una bobina exploradora, con unas dimensiones físicas de 30 mm por 90 mm (paso polar del inductor = 30 mm, Ancho del inductor = 70 mm), compuesta de 10 espiras, se ha medido la f.e.m. inducida mediante osciloscopio: Tektronix TDS

754C, (Color four CHannel Digitizing Oscilloscope with Insta Vu Acquisition, 500 MHz, 2 GS/s).

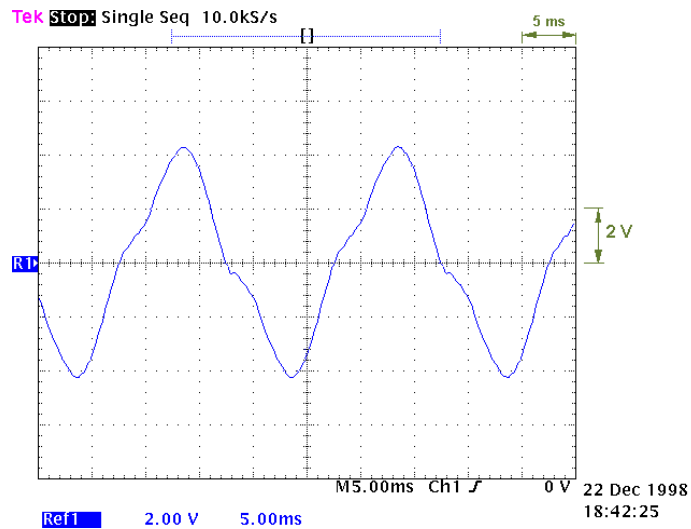


Fig. 62: F.e.m. medida con la sonda en el entrehierro del motor lineal M-1 entre las ranuras 10-12.

La señal de tensión obtenida mediante la bobina exploradora o sonda, no es senoidal, pero aproximamos la forma de onda a una senoidal a efectos de simplificar los cálculos:

$$\text{Tensión en la sonda} = 4,4\text{V}/\sqrt{2} = 3,11 \text{ V}$$

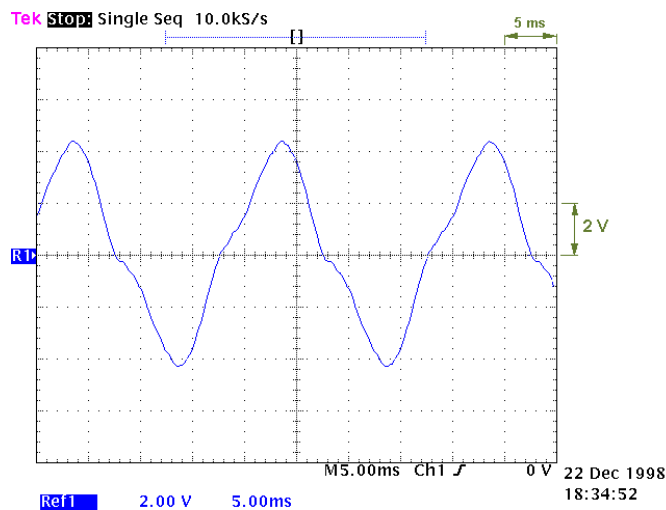


Fig. 63: F.e.m. medida con la sonda en el entrehierro del motor lineal M-1 entre las ranuras 4-6

La tensión medida por la sonda en el entrehierro del motor lineal M-1 en el centro es de:

$$E_{\text{medida}} = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \phi = 3,11 \text{ V}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$N = 10 \text{ espiras}$$

$$\phi = 0,0014 \text{ Weber}$$

$$S = 0,03 \cdot 0,07 = 0,0021 \text{ m}^2$$

La inducción en el entrehierro del motor lineal M-1 en el centro es de:

$$B = \phi / S = 0,66 \text{ Tesla}$$

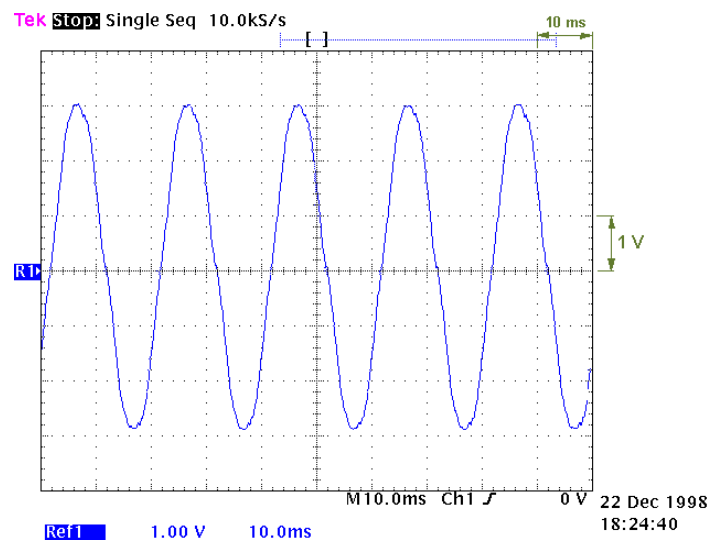


Fig. 64: F.e.m. medida con la sonda en el entrehierro del motor lineal M-1 entre las ranuras 1-2.

$$\text{Tensión en la sonda} = 3V/\sqrt{2} = \mathbf{2,12 \text{ V}}$$

La tensión medida por la sonda en el entrehierro del motor lineal M1, en los extremos es de:

$$E_{\text{medida}} = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \phi = 2,12 \text{ V}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$N = 10 \text{ espiras}$$

$$\phi = 0,000955 \text{ Weber}$$

$$S = 0,03 \cdot 0,07 = 0,0021 \text{ m}^2$$

La inducción en el entrehierro del motor lineal M-1 en los extremos es de:

$$B = \frac{?}{S} = 0,45 \text{ Tesla}$$

Conclusiones

La inducción en los extremos es menor que en el centro debido a que en las tres primeras y en las tres últimas ranuras sólo existen la mitad de los conductores que en las ranuras del centro. Podemos observar, no obstante, que la inducción en los extremos no es la mitad, sino que es un valor superior.

Según el cálculo paramétrico (ver apartado 3.2.3.2) la inducción teórica que deberíamos tener es de 0,72 T, mientras que la medida es de 0,66 T, no estando este valor demasiado lejos del teórico.

3.5 - Observaciones

Para poder realizar la característica real fuerza-deslizamiento del motor lineal precisaríamos muchos metros de carril inducido, los suficientes como para ir cargando una vagoneta con pesos e ir comprobando su velocidad durante el tiempo necesario para que el motor se estabilice.

Este problema se podría resolver cambiando la morfología del inducido, de tal manera que el inducido pudiese girar como un disco de un contador de energía eléctrica y pudiese frenar.

3.6 - Conclusiones

Si el motor lineal tuviese ventilación forzada podríamos sacarle más potencia.

Para hacer el ensayo de forma rigurosa habría que instalar sensores de temperatura en los devanados tipo PT100.

El dinamómetro para este motor debería ser de una escala de 1962 N, como mínimo, ya que durante el arranque, debido a la flexibilidad de los anclajes, se vio que la aguja del dinamómetro superaba el fondo de escala de 981 N.

También se podría disponer una desmultiplicación con poleas que resta precisión pero evita los impactos.

Para medir el campo magnético en el entrehierro se deberían instalar bobinas exploradoras de forma fija en todas las ranuras.

El ensayo debería hacerse en el menor tiempo posible para evitar daños en los devanados.

Todo esto nos hace pensar que sería necesario una bancada de ensayos, y de adquisición de datos de forma automatizada.

El acoplamiento entre el inductor y el inducido no es bueno debido principalmente al gran entrehierro que se dispone (6 mm).

En trabajos realizados por otros profesores de la ETSE de la URV (Javier Maixé y Hugo Valderrama), en transformadores de alta frecuencia (35KHz), se vio que el acoplamiento entre un devanado primario y uno secundario realizado mediante conductores planos (pletinas) era malo, y el flujo de dispersión alto. Posteriormente sustituyeron los conductores planos por mazos de hilos redondos y mejoró el acoplamiento [39].

Para impulsar un fluido, hay que tener en cuenta que este no se puede discretizar y que se comporta como una lámina conductora; por lo tanto, el problema del mal acoplamiento debido al inducido y al entrehierro siempre lo tendremos, ya que es intrínseco a esta geometría.

3.7 - Propuestas de mejora del prototipo M-1

Habría que poner ventilación forzada.

Se debería de instalar sensores de temperatura en los devanados tipo PT100.

Instalar devanados sonda de forma fija en los dientes para medir la inducción en el entrehierro.

Actualmente tenemos el inductor con unas ranuras de 6 mm de ancho por 15mm de profundidad (en total 90 mm^2 de sección de ranura).

Se dispusieron 68 conductores redondos de 1mm de diámetro por ranura, con un papel aislante de 0,2 mm de grueso. El bobinador de la empresa "Talleres Petit" de Tarragona nos cerró la ranura con una cuña de poliuretano de 1,5 mm de grueso.

Si los conductores fuesen cuadrados de 1mm de lado, ocuparían 68 mm^2 . El papel aislante ocupa $7,2 \text{ mm}^2$ de la ranura, y si tenemos en cuenta que no hay fuerza centrífuga alguna que nos obligue a utilizar cuñas de cierre (actualmente la ranura está ocupada $75,2 \text{ mm}^2$ de un total de 90 mm^2) esto nos deja unos 15 mm^2 libres es decir un 83% de ocupación de la ranura.

Como hemos podido comprobar la inducción real en el entrehierro es baja (0,66 Tesla), debido a la saturación de los dientes, (ver apartado 3.4.5). Por tanto, la sección de los dientes del inductor debería aumentarse y disminuirse la sección de la ranura,(por ejemplo pasar los dientes de 4 mm a 5 mm, manteniendo el paso de los dientes de 10 mm). Esto quiere decir que se tendría una ranura de ancho 5 mm, y que deberíamos pasar de 15 mm a 18 mm de profundidad de la ranura para mantener la sección de la ranura y la f.m.m.. Esto nos permitiría disminuir la saturación de los dientes y obtener una inducción en el entrehierro más elevada manteniendo la misma sección de cobre y el mismo consumo.

$$\bar{B}_g \approx \frac{1}{K_{Fe}} \frac{a_d}{d} \bar{B}_d \approx 0,9 \frac{5}{10} 2 \approx 0,9 (T)$$

Según apartado 2.3 la fuerza de tracción del motor lineal plano es proporcional a la inducción en el entrehierro. Por tanto, este cambio en el diseño de la ranura nos podría hacer aumentar la fuerza de tracción del motor lineal, hasta un máximo del 25%, de 637 N hasta 796 N.

3.8 - Hipótesis del prototipo M-1 con inducido líquido

Las fuerzas medidas anteriormente las realiza el motor lineal cuando tiene como inducido un raíl de aluminio de 4mm de grueso y 1mm de entrehierro por cada lado o sea 2mm en total (ver apartado 3.4.2.).

Si se sustituye el raíl de aluminio por un recipiente de políglas con un grueso de 2mm cada pared, nos queda un espacio de 2mm libre para introducir un líquido que sea conductor (fotos 9 y 10 y figura 65).



Foto. 9 : Recipiente de poliglas.



Foto. 10: Prototipo M-1 con inducido líquido.

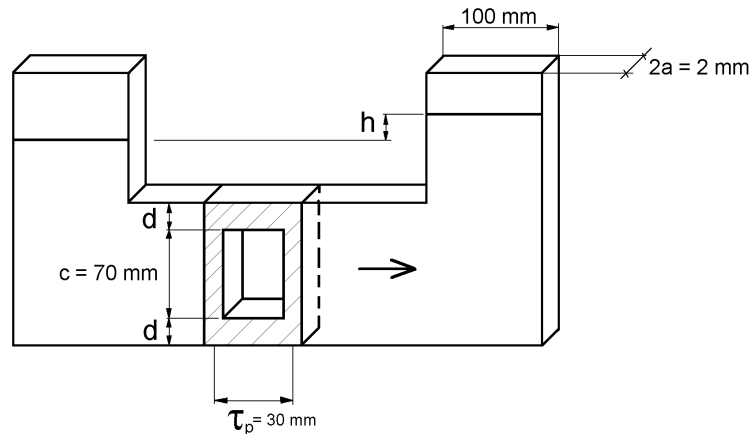


Fig.65 : Espira elemental del agua.

Si este recipiente lo realizamos en U en forma de vasos comunicantes a fin de eliminar los efectos del menisco producido por el contacto entre un líquido y una pared, y la sección vertical de este vaso comunicante la hacemos de 100mm (0,1m) por 2mm (0,002m), entonces la fuerza necesaria para elevar esta columna de líquido 1cm (0,01m) dependerá de la densidad del líquido.

Si tomamos a título de ejemplo, agua saturada de sal:

$$\begin{aligned} \text{Fuerza} &= \text{Peso del agua} = \rho \cdot \text{Volumen} \cdot g = \rho \cdot (\text{Sección} \cdot \text{Altura}) \cdot g = \\ &= 1025 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,8 \text{ m/s}^2 \cdot (0,1\text{m} \cdot 0,002 \text{ m}) \cdot 0,01\text{m} = 0,02 \text{ N} \end{aligned}$$

Tomamos un valor de la conductividad del agua saturada de sal de 2 S/m.

Hipótesis:

Si con una conductividad del inducido (aluminio) de $2,46 \cdot 10^7$ (S/m) conseguimos una fuerza del orden de 510 N, sustituyendo el inducido de aluminio por otro como es el agua saturada de sal con una conductividad de 2 (S/m), tendremos una fuerza sobre el inducido del orden de 0,00004N

$$\begin{aligned} 2,46 \cdot 10^7 \text{ (S/m)} & \text{ ---- } 510 \text{ N} \\ 2 \text{ (S/m)} & \text{ ----- } 0,00004 \text{ N} \end{aligned}$$

La fuerza aplicada al agua teóricamente es 12.750.000 veces menor que en el inducido sólido (aluminio)

O sea, unas 500 veces menor que la fuerza mínima para elevar la columna de agua 1 cm.

Dicho de otra manera, si no mejoramos el motor lineal, necesitamos una potencia 500 veces mayor para obtener una fuerza para elevar la columna de agua 1cm. Esto representaría una potencia absorbida de unos 7500 KVA.

Dado que los motores lineales trabajan con un factor de potencia muy bajo, esta potencia la puede suministrar un equipo de condensadores.

También es posible que deba mejorarse el factor de calidad G * de ahí el interés de tecnologías y geometrías que admitan trabajar con frecuencias más elevadas.

Para un motor MHD se representa en una gráfica la relación entre la eficiencia eléctrica y el campo magnético aplicado, que se reproduce aquí (fig.66) ¿24? :

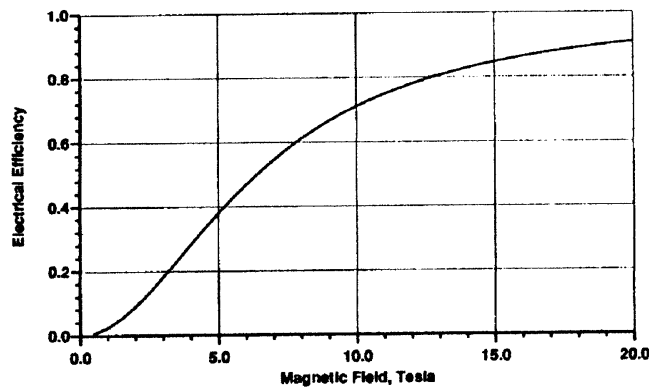


Fig. 66: Relación entre la eficiencia eléctrica y el campo magnético aplicado en un motor MHD ¿24?.

* El factor de calidad G es un concepto introducido por E.R. Laithwaite (Ref. 4) en su libro "Máquinas de inducción especiales". "El factor de calidad nos muestra la capacidad de la máquina para transformar energía, y se expresa como un producto de la velocidad de rotación de la máquina por la constante de tiempo del circuito eléctrico del inducido"

Se expresa:

$$G = \frac{L \cdot \omega}{R \cdot \tau}$$

G = Factor de calidad

L = Coeficiente de autoinducción en H

R = Resistencia en ohm

ω = Velocidad angular en rad/s

τ = Constante de tiempo del circuito eléctrico inductivo

Los resultados de la figura 66, indican que hay un rápido incremento en la eficiencia entre $B= 1$ y $B= 10$ Tesla, donde la eficiencia eléctrica sube de un 4% a un valor de 71% . Para $B=20$ T, la eficiencia eléctrica está cercana al 91%.

Estos valores de inducción tan elevados no se pueden conseguir con las máquinas eléctricas clásicas, ya que su funcionamiento se basa en el ferromagnetismo y esto limita la inducción máxima de trabajo alrededor de 1,5 Tesla debido a la saturación del hierro. Las únicas máquinas que permiten estas inducciones son máquinas electrodinámicas, en las cuales ya está trabajando el equipo del Dr.Bosch [40].

Si suponemos para los motores IMHD, que es nuestro caso, que la relación entre la eficiencia eléctrica y el campo magnético es similar al caso de los motores MHD, la potencia necesaria para impulsar el agua se reduciría considerablemente.

3.9 - Fuerzas de atracción del motor lineal M-1

Según mediciones efectuadas tenemos 0,66T en el interior del motor lineal y 0,45T en los extremos(tres últimas ranuras).

La superficie afectada por los 0,66T es de $0,0168 \text{ m}^2$ y la superficie afectada por los 0,45T es de $0,00455 \text{ m}^2$.

Esto proporciona 2875 N y 363 N respectivamente, con un total de **3238 N de atracción** entre los dos semiinductores.

Los dos semiinductores, están fijados mecánicamente mediante dos soportes de aleación de aluminio, según se puede ver en la figura 67. La fuerza de atracción a hemos representado en la mitad de los dos semiinductores. Si esta fuerza la multiplicamos por la distancia que hay entre el punto donde hemos representado las fuerzas y la esquina de la estructura B, aparece un par de 214 N.m. En el caso de la esquina A, aparece un par de 181 N.m que hace desplazar los dos brazos hacia el interior.

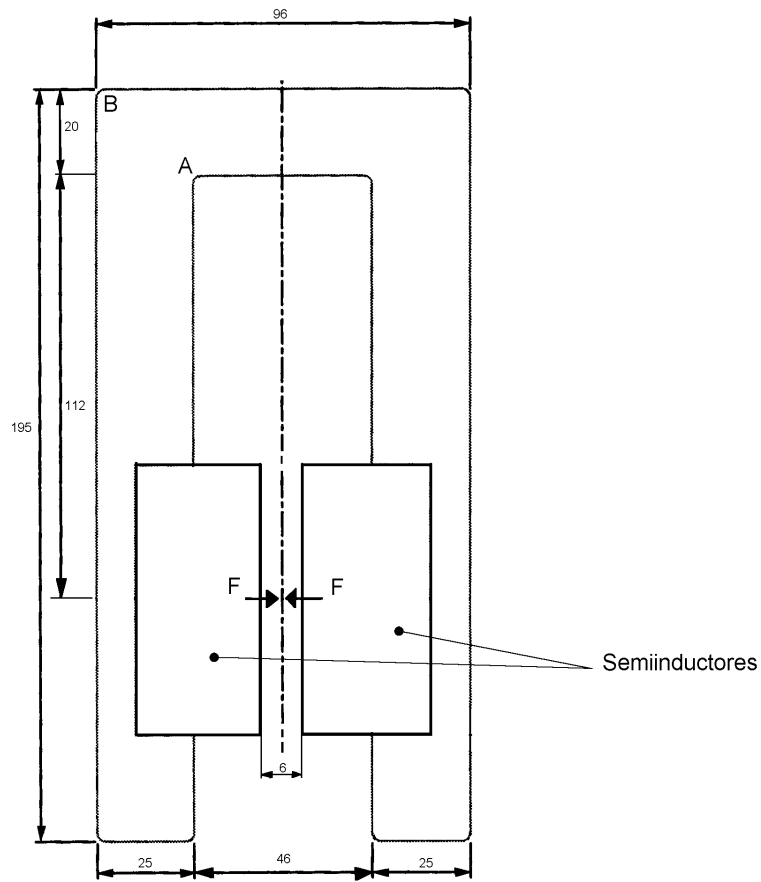


Fig.67 : Estructura-soporte de aleación de aluminio ($F = 3238 \text{ N}$).

3.10 - Fuerza de tracción del motor lineal M-1

Debido a que el campo magnético en el entrehierro no es uniforme, puede diferenciarse el campo magnético interior del motor lineal M-1 y el campo magnético en los extremos. Aplicaremos, por tanto, las fórmulas para cada zona uniforme.

Las tres primeras ranuras y las tres últimas están bobinadas con la mitad de conductores que las ranuras internas, o sea 34 conductores por ranura (ranuras extremas). Según mediciones realizadas en estas zonas tenemos una inducción de 0,45 T. La longitud del motor lineal afectado es de 0,065 m.

En el interior del motor lineal se tienen 68 conductores por ranura y 0,66 T, siendo la longitud afectada de 0,24 m.

Sustituyendo los valores en la fórmula de la carga lineal para un semiinductor:

$$\begin{aligned}2p &= 2 \\m &= 3 \\n_{pf} &= 1 \\Z_n &= 34 \\I_f &= 20,5 \text{ A} \\L_1 &= 0,065 \text{ m}\end{aligned}$$

$$q_1 = 64350 \text{ A/m}$$

$$\begin{aligned}2p &= 8 \\m &= 3 \\n_{pf} &= 1 \\Z_n &= 68 \\I_f &= 20,5 \text{ A} \\L_2 &= 0,24 \text{ m} \\q_2 &= 139400 \text{ A/m}\end{aligned}$$

Sustituyendo los valores en la fórmula de la fuerza ficticia:

$$\begin{aligned}C &= 0,07 \text{ m} \\L_1 &= 0,065 \text{ m} \\q_1 &= 64350 \text{ A/m}\end{aligned}$$

$$F_{b1} = 9,3 \text{ N}$$

$$\begin{aligned}C &= 0,07 \text{ m} \\L_2 &= 0,24 \text{ m} \\q_2 &= 139400 \text{ A/m}\end{aligned}$$

$$F_{b2} = 109,3 \text{ N}$$

Fuerza ficticia en bornes debido a un semiinductor:

$$F_b = F_{b1} + F_{b2} = 118,6 \text{ N}$$

Fuerza ficticia en bornes debido a los dos semiinductores:

$$F_{b\text{-total}} = 2 F_b = 237,2 \text{ N}$$

Según mediciones el factor de potencia vale 0,2789.

Entonces la fuerza ficticia en N valdría:

$$F_{b\text{-total}} \cdot \cos\phi = 66,15 \text{ N}$$

Esta fuerza ficticia, como ya definíamos en el apartado 2.3, es la relación entre la potencia en bornes de la máquina P_b y la velocidad lineal del campo a velocidad sincrónica V_0 .

$$F_b \approx \frac{P_b}{V_s} \text{ N} \tag{2.3.a}$$

De esta potencia en bornes, parte es degradada en calor por efecto Joule en la resistencia de los devanados primario y secundario, y parte en el hierro del estator. Debido a que el motor lineal es asíncrono, la velocidad de sincronismo no será alcanzada nunca.

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

Según el apartado 3.4.2, a 220 V la fuerza medida con el inductor frenado (velocidad = 0) es de 510,12 N.

Para un prototipo de motor lineal de inducción de simple estator, de 140 kW, trifásico, alimentado a una tensión de 324 V, y a una frecuencia de 37 Hz, se obtiene la relación de la fuerza de tracción-velocidad representada en la fig. 68 [22].

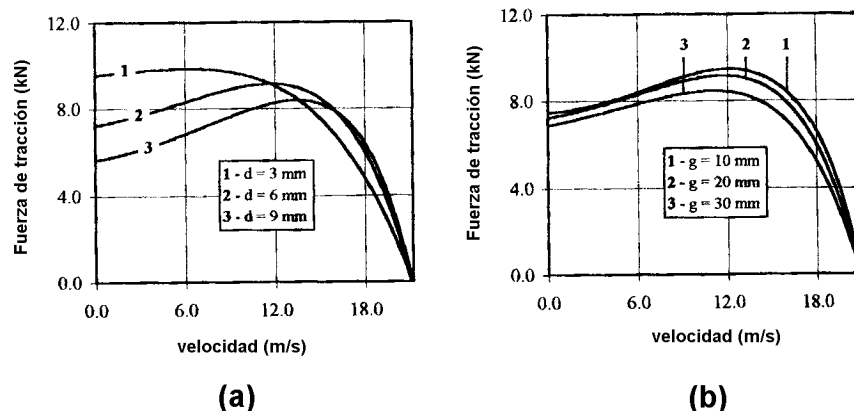


Fig.68 : **a:** Fuerza de tracción - velocidad, para varios espesores (d) de lámina conductora de aluminio y para un entrehierro de $g=10$ mm.
b: Fuerza de tracción - velocidad, para varios espesores (g) de entrehierro de lámina conductora de aluminio $d=6$ mm.

Para el mismo prototipo de motor lineal de inducción de simple estator, de 140 kW, trifásico, alimentado ahora a una tensión de 107 V, y una frecuencia de 12 Hz, se obtiene la relación fuerza de tracción – velocidad representada en la fig.69

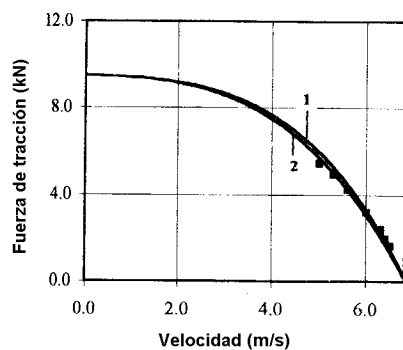


Fig.69 : Fuerza de tracción - velocidad.

El prototipo M-1, tiene una velocidad de sincronismo de 3 m/s, a 50 Hz, lo que nos hace suponer que la curva Fuerza de tracción - velocidad del prototipo M-1 será más parecida a la de la figura 69.

Resumen

Prototipo	Fuerza de tracción (N) (v=0)	Fuerza ficticia (N)
M-1	510,12	66,15

Tabla 7: Resumen de fuerzas prototipo M-1

3.11 - Tiempo y fuerza de aceleración del prototipo M-1

En el prototipo M-1, la masa que debe acelerarse es de 30 kg. La velocidad de régimen es de 2,7 m/s. La velocidad de sincronismo es de 3 m/s.

Según el apartado 3.4.2, a 220 V la fuerza medida con el inductor frenado (velocidad = 0) es de 510,12 N.

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

F_a : N
 m : kg
 a : m/s^2

Según estos valores la masa es acelerada con un valor de:

$$a \approx \frac{F_a}{m} \approx \frac{510,12}{30} \approx 17 \text{ m/s}^2$$

Si en el momento del arranque hemos medido una fuerza de 510,12 N, podemos considerar que el tiempo medio para pasar la máquina de 0 a 2,7 m/s es de:

$$T \approx \frac{V}{a} \approx \frac{2,7 \text{ m/s}}{17 \text{ m/s}^2} \approx 0,158 \text{ s}$$

T : s
 V : m/s
 a : m/s^2

A 50 Hz, (período de 0,02 s), el prototipo M-1 tarda unos 8 períodos en ponerse a velocidad de régimen.

Según el apartado 3.4.4 se puede ver en la figura 56 que aparentemente el prototipo M-1 arranca en 3 períodos.