

FACTORES DE UN MODELO ELECTROMAGNETICO A ESCALA  
PARA DESARROLLAR MOTORES LINEALES DE LABORATORIO

BECERRA CARLOS y BERMUDEZ GUSTAVO, Ings.  
ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL (ESPOL)

RESUMEN

El presente trabajo emplea un "modelo electromagnético" basado en factores dimensionales de longitud, corriente y número de vueltas, los cuales fueron seleccionados como materia básica para desarrollar teórica y experimentalmente un sistema prototipo de levitación-propulsión magnética de vehículos a pequeña escala de laboratorio. El trabajo proporciona las especificaciones técnicas generales del diseño del modelo a escala, concebido primordialmente en base a una máquina real de 4000 Kg de masa y 12 m/s de velocidad. El contenido del artículo complementa otros estudios que se están llevando a cabo en la ESPOL, con el propósito de construir experimentalmente un modelo definitivo de tren magnético a escala.

INTRODUCCION

La realización de un gran proyecto requiere siempre de un trabajo mancomunado y participativo, y la mayoría de las veces requiere más de iniciativa y disciplina de trabajo, que de transferencia de tecnología. En el caso especial a que se refiere este artículo, éste acoge la surgida idea de poder construir un corto sistema de transporte de personal en el futuro campus de "La Prosperina" de la ESPOL, utilizando un vehículo magnético [1].

Por supuesto, la idea no puede ser realizable inmediatamente ya que se necesita de un profundo proceso de análisis económico, físico y técnico. Sin embargo, imponiendo una disciplina de trabajo e iniciativa, se han empezado ya algunos estudios locales que han proporcionado buenos resultados preliminares. Estos estudios iniciales han llevado a comenzar la construcción de un modelo a escala de laboratorio de un tren magnético, de cuyas pruebas experimentales se reportará oportunamente. A todo esto, obviamente, seguirán variados estudios teóricos y experimentales posteriores.

El presente trabajo ilustra, en primer lugar, un extracto de la teoría sobre el modelo electromagnético (complementándose con un Apéndice). Muestra también las características asumidas y calculadas de la máquina real y luego proporciona los parámetros generales del modelo a escala de laboratorio. Es sobre estos últimos en que se está basando la actual construcción del modelo experimental del tren magnético, el cual se implementará solamente -en su fase inicial- con propulsión magnética del motor lineal de inducción, para luego pasar a acondicionar la levitación y su respectivo control.

1.- PRESENTACION DEL MODELO ELECTROMAGNETICO

El asunto de resolver electromagnéticamente una máquina de inducción lineal, es bastan-

te complejo, en comparación con el caso de la máquina rotativa de inducción, debido más que todo a los acentuados efectos de borde. Esto hace necesario una idealización simplificada del modelo analítico de los motores lineales.

El uso de los modelos a escala es una gran alternativa, tal como lo ha sido en otras aplicaciones, por ejemplo, en el estudio de sistemas de potencia [2], [3] donde se utiliza la técnica del modelaje a escala por circuito equivalente. En cambio, en el presente trabajo se emplea el denominado "modelo electromagnético", cuyo criterio clásico señala que la relación de las componentes de campo entre dos puntos de cierta región de la máquina real, debe ser igual a la relación de las componentes equivalentes en los puntos correspondientes del modelo a escala.

En ese sentido, es necesario mantener el mismo tipo de eficacia electromagnética cuando se hace un modelo a escala de la máquina [4] [5], [6]. En la figura 1 se ilustra las interrelaciones entre los circuitos eléctrico y magnético de una máquina cualquiera, apreciándose que para obtener flujo y corriente se oponen la resistencia y la reluctancia. En otras palabras, el inverso de estos dos parámetros es proporcional a la buena calidad de la máquina, a lo que se denomina "Factor de Bondad", dado por

$$G = \omega \mu \sigma \frac{A_m A_e}{L_m L_e} \quad (1)$$

donde  $\omega$  es la frecuencia de operación,  $\mu$  es la permeabilidad,  $\sigma$  es la conductividad eléctrica,  $A_m$  y  $A_e$  son las áreas transversales de los circuitos, y  $L_m$  y  $L_e$  son las longitudes promedio de las líneas de campo respectivo de los circuitos.

La ecuación (1) puede expresarse, para el caso de un motor lineal de inducción, en la forma [6]:

$$G = \frac{p^2 \mu \omega}{\pi^2 h \rho_r} \quad (2)$$

donde  $p$  es el paso polar,  $\rho_r$  es la resistividad superficial del secundario y  $h$  es la longitud del entrehierro. En el caso de una máquina de rotor laminar,  $\rho_r$  es igual a  $\rho_c / t_L$ , donde  $\rho_c$  es la resistividad volumétrica del material conductor y  $t_L$  es el espesor de la lámina. Es decir que el denominador de la ecuación (2) señala la calidad del material y la habilidad de construcción para llenar el entrehierro con conductor [6]. Por otro lado, los factores  $\omega$  y  $p$  en el numerador indican que una máquina de velocidad fija puede mejorarse aumentando  $p$  y disminuyendo  $\omega$  hasta el punto donde los efectos de borde empiezan a dominar.

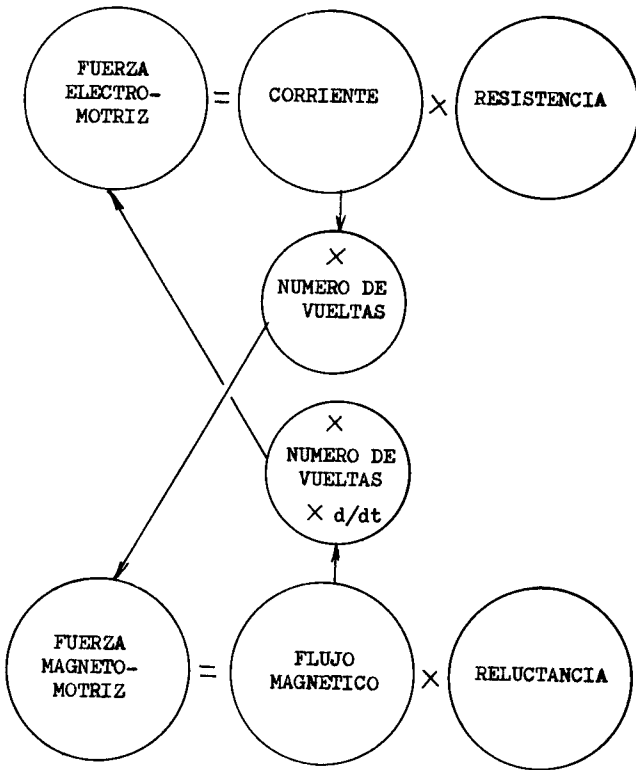


Fig.1.-Interacción entre los circuitos eléctrico y magnético, en una máquina.

Para el caso de nuestro modelaje, el Factor de Bondad se escribe como 5

$$G = \lambda^2 / 4 \pi^2 \delta^2 \quad (3)$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda asociada con la frecuencia de operación, y  $\delta$  es la profundidad de penetración por el efecto piel- dada por  $\delta = \sqrt{2/\omega\mu\sigma}$ . Por consiguiente, para obtener un correcto modelaje electromagnético se impone que los Factores de Bondad del modelo a escala y de la máquina real, sean equivalentes; es decir,

$$\lambda_R^2 / 4 \pi^2 \delta_R^2 = \lambda_E^2 / 4 \pi^2 \delta_E^2 \quad (4)$$

donde los subíndices R y E sirven para determinar "en la máquina real" y "en el modelo a escala" respectivamente.

Para ofrecer buenas perspectivas de construcción del modelo a escala, el análisis dimensional da libertad para escoger los factores de escala necesarios. Aquí se sigue la sugerencia de usar sólo tres factores primarios de escala [1], [7], [8]:

1. Factor  $K_L$ : Que relaciona la dimensión en el modelo a escala con la correspondiente dimensión en la máquina real.
2. Factor  $K_I$ : Que es la relación entre la intensidad de corriente en el modelo a escala y la corriente en la máquina real (asumiendo materiales lineales e isotrópicos en los núcleos magnéticos).
3. Factor  $K_N$ : Que relaciona el número de

vuelta en devanados de la máquina a escala y el número de vueltas en devanados correspondientes de la máquina real.

En definitiva si mantenemos la relación  $\lambda/s$  igual tanto en el modelo a escala como en la máquina real, y si  $\mu_R = \mu_E$ , tendremos

$$f_R \sigma_R = K_L^2 f_E \sigma_E \quad (5)$$

lo cual indica que para ejecutar el modelo, la frecuencia y/o la conductividad del material deben aumentarse.

La tabla I muestra la lista de otros parámetros cuyos factores de escala fueron calculados a partir de  $K_L$ ,  $K_I$  y  $K_N$ .

TABLA I

Parámetro	Factor (E/R)
Frecuencia de operación	$K_L^{-2}$
Voltaje	$K_N^2 K_I / K_L$
Impedancia terminal	$K_N^2 / K_L$
Potencia de entrada	$K_N^2 K_I^2 / K_L$
Fuerza	$K_N^2 K_I^2$
Velocidad del vehículo	$K_L^{-1}$

## 2.- CALCULOS DEL PARAMETRO DEL MODELO

Antes de utilizar la tabla I para determinar los parámetros del modelo a escala, es imprescindible establecer con qué especificaciones técnicas se va a trabajar en la máquina real.

Como se expresó anteriormente, se ha pensado en la construcción futura de un sistema de "maglev" [1] para transporte de personal en el nuevo campus. Los costos y repercusiones de este gran proyecto no han sido determinados todavía, mas lo más importante por ahora es diseñar y experimentar con modelos de "maglev" a escala de laboratorio apropiada; en esa forma se estará preparando, con los mejores argumentos técnicos y económicos del caso para poder tomar una decisión más acertada más adelante.

Con el propósito arriba expuesto se ha men- talizado un vehículo real [1], [8] cuya concepción gráfica aparece en la figura 2. Se han asumido preliminarmente las siguientes características físico-eléctricas:

- Velocidad del vehículo:  $v_R = 12$  m/s.
- Masa promedio (incluyendo ocho pasajeros):  $m_R = 4000$  Kg.
- Dimensiones: Largo 4.8 m; ancho 2.1 m; alto 2.0 m (interior).
- Motor lineal: Tipo primario corto bilateral de inducción, 3 $\phi$ , cuyo corte esquemático aparece en la figura 3. Además, la figura 4 ilustra la disposición física del devanado primario móvil y del secunda

rio de la riel de aluminio.

-Voltaje de operación del motor:  $V_R=480V$ , trifásico.

-Frecuencia de operación:  $f_R=60$  Hz.

-Aceleración media:  $a_R=2.0$  m/s<sup>2</sup>.

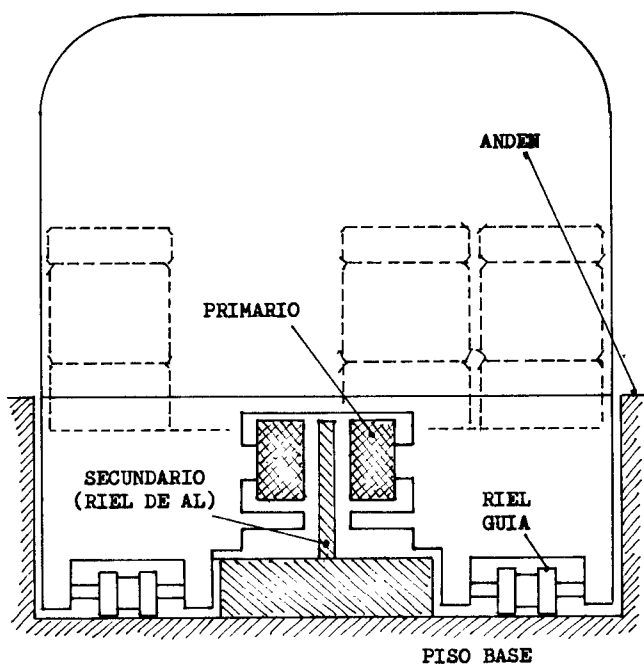


Fig. 2.- Corte transversal de la disposición del primario móvil y la riel secundaria de aluminio, en una de las concepciones del vehículo.

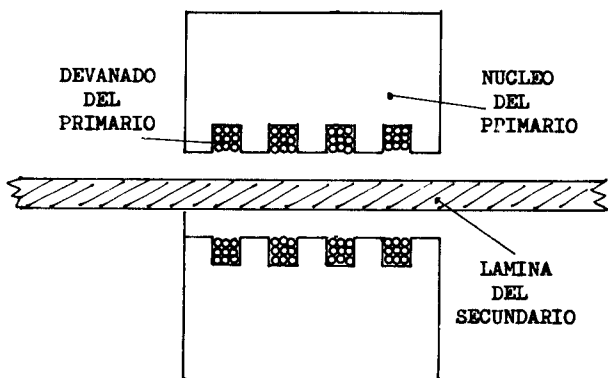


Fig. 3.- Ilustración -sin escala- del motor lineal del tipo Primario Corto Bilateral.

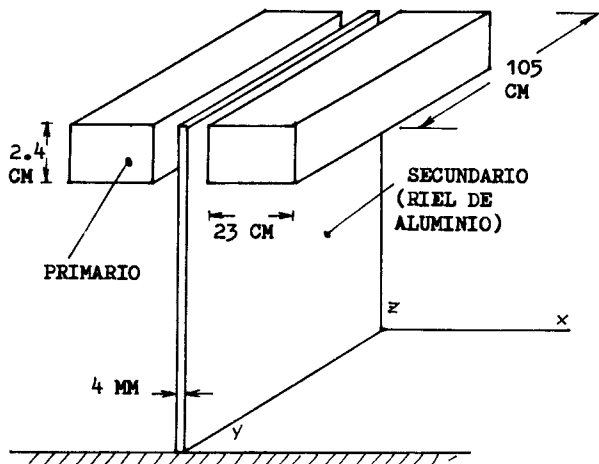


Fig. 4.- Dimensiones y colocación aproximada del sistema primario-secundario.

Con todas las anteriores asunciones, podemos obtener los parámetros necesarios de la máquina real. El Apéndice de este artículo expone un extracto de las derivaciones teóricas más importantes de los mencionados parámetros. Así mismo se han utilizado ciertas curvas experimentales proporcionadas por la literatura [8], [9], [10], [11], para efectuar algunos pasos del diseño. El cálculo dio como resultado los siguientes parámetros:

-Fuerza de propulsión:  $F_R=8000N$ .

-Paso polar:  $p_R= 12/(2X60) = 10cm$ .

-Entrehierro:  $h_R=p_R/12.5 = 8mm$ . Aquí se escogió una relación de 12.5 para  $p_R/h_R$  ya que se utiliza aluminio en el secundario (es decir, material no-magnético), y la experiencia demuestra que esa relación debe ser menor a 50.

-Eficiencia máxima de la máquina: Fue encontrada empleando la figura 5, la cual ilustra curvas experimentales encontradas en las referencias, de la eficiencia máxima vs el entrehierro para diversos valores de velocidad. Se encontró que la eficiencia máxima esperada era cercana a 58%.

-Deslizamiento: De la curva experimental de la figura 6 se encontró que  $s=0.17$ . La curva muestra la eficiencia en función del deslizamiento para dos valores de longitud de entrehierro (0.8cm en nuestro caso).

-Factor de potencia: De la curva experimental de la figura 7 se halló que  $\cos\theta=0.59$ .

-Longitud del núcleo: Asumiendo seis pares de polos se obtiene que  $L_p=1$  m. La derivación pertinente es mostrada en el Apéndice.

-Potencia de entrada: Se encontró que  $P_{iR}=175KW$ , asumiendo una potencia mecánica del orden de los 100KW -incluyendo pérdidas-. Se utilizó la teoría ilustrada en el Apéndice del artículo.

-Número de ranuras por polo por fase:  $q=2$ .

-Campo magnético en el entrehierro:  $H_n=90A/m$ .

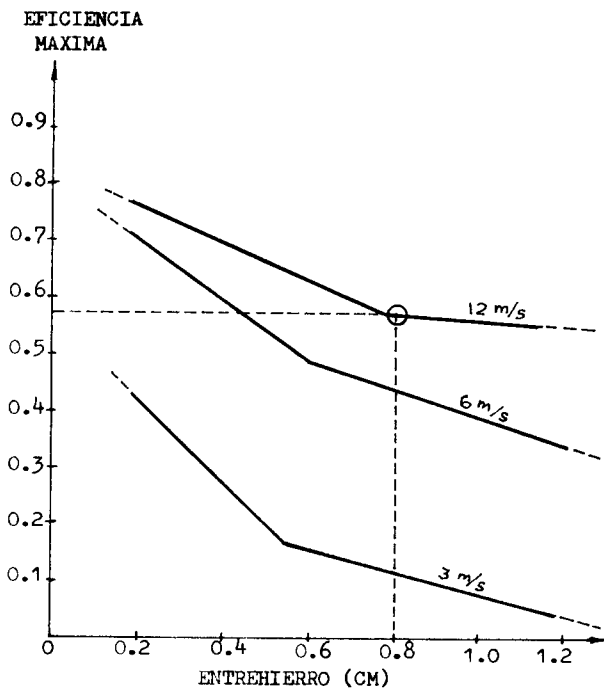


Fig. 5.-  $\eta_{\text{máx}}$  en función de  $h$ , para tres valores diferentes de velocidad.

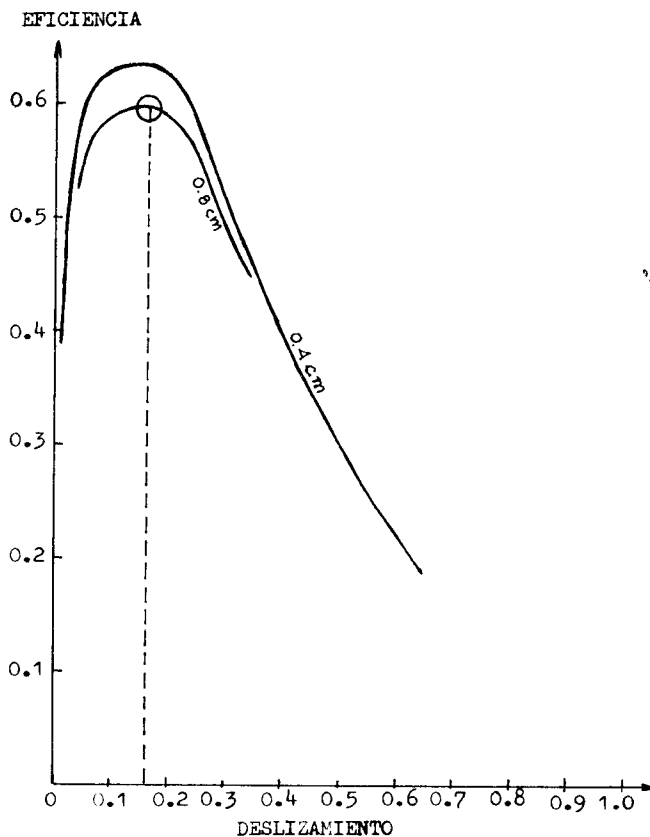


Fig. 6.- Curva que representa la eficiencia vs  $s$ , para  $h=4\text{mm}$  y  $h=8\text{mm}$ .

-Campos en el núcleo:  $B_n=1.7 \times 10^{-2} \text{Wb/m}^2$ .  
 $H_n=50 \text{A/m}$ .

-Número de vueltas por diente: 20.

-Impedancia:  $Z_R=2.7$  ohmios.

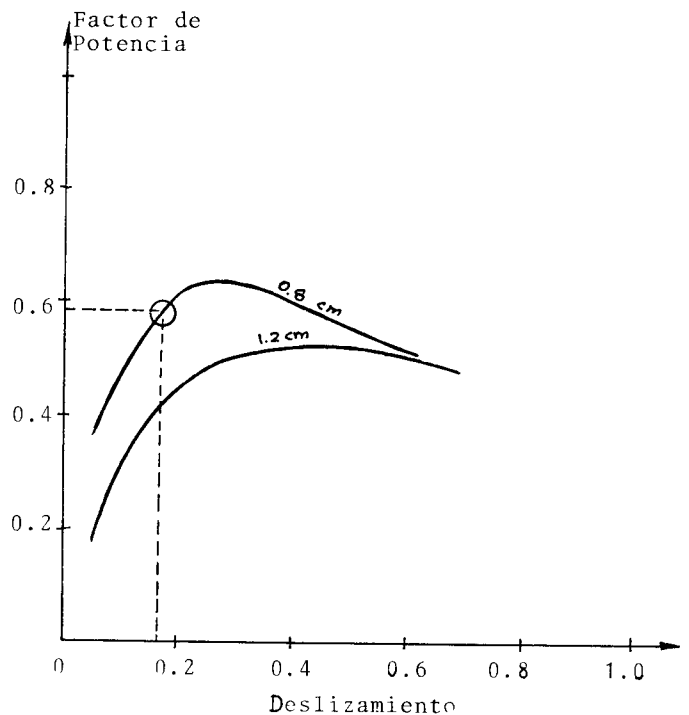


Fig. 7.-  $\cos\theta$  en función de  $s$ , válida para  $12\text{m/s}$  y entrehierros de  $8\text{mm}$  y  $12\text{mm}$ .

Ahora, una vez esquematizadas las especificaciones técnicas de la máquina real, podemos efectuar fácilmente el escalamiento utilizando la tabla I. Para ello asumimos los siguientes valores de los factores primarios de escala:  $K_L=0.1$ ;  $K_I=0.25$ ; y,  $K_N=0.1$ .

A continuación se dan los principales parámetros obtenidos para el modelo a escala de laboratorio, con los cuales se está trabajando en la construcción y pruebas:

-Frecuencia:  $f_E=6 \text{ KHz}$ .

-Voltaje:  $V_E=30\text{V}$ ,  $3\theta$ .

-Impedancia:  $Z_E=1.7$  ohmios.

-Empuje:  $F_E=5 \text{ N}$ .

-Velocidad:  $v_E=100 \text{ m/s}$ .

-Potencia de entrada:  $P_{iE}=1.09 \text{ KW}$ .

### 3.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1.- Para optimizar las máquinas lineales, el uso del modelo electromagnético ha sido altamente beneficioso, para implementar pruebas experimentales a escala pequeña de laboratorio, sin necesidad de emplear voluminosas pistas y vehículos magnéticos.

3.2.- El trabajo presentó primeramente la concepción física y los parámetros eléctricos de una asumida máquina real, para luego calcular las características primordiales de lo que sería el modelo a escala.

3.3.- Se observa que en los motores lineales existen los mismos efectos físicos electromagnéticos que en las máquinas rotativas y otros efectos especiales adicionales que se deben a la configuración de es

tas máquinas -como los efectos longitudinales y transversales de borde-.

3.4.- El trabajo no ha presentado toda la gama teórica detrás de los motores lineales. Muy por el contrario, espera que sus resultados pueden dar inicio a muchas otras labores de investigación. Se recomienda que éstas se centren en los siguientes tópicos:

- Desarrollo de sistemas prototipos de control para manejo del vehículo;
- Implementación de la levitación magnética, por ayudar ésta a proporcionar un bajo nivel de ruido ambiental, mayor comodidad al transportado y brindar mejores perspectivas hacia un "tren rápido".

## APENDICE

### EXTRACTO DE LAS BASES TEORICAS

#### A.1.- ASUNCIONES PRINCIPALES.-

Todas las expresiones que correlacionan las cantidades físicas del motor lineal y la optimización del diseño, fueron obtenidas en base a las siguientes consideraciones:

- Las pérdidas en el hierro son despreciables.
- El desplazamiento de fase de las corrientes del secundario y de magnetización, es de 90° para una armadura no-magnética y 60° para una armadura ferromagnética.
- La diferencia entre el voltaje de la fuente y la FEM es igual a la caída de voltaje en la reactancia del primario.

#### A.2.- DERIVACION DE LAS RELACIONES.-

La potencia mecánica de un motor lineal viene dada por una expresión similar a la de una máquina rotativa asincrónica:

$$P_m = P_s \eta \cos\theta \quad (a.1)$$

donde  $P_s$  es la potencia de entrada aparente, la cual puede calcularse a partir de

$$P_s = (V/E) 2K_b p b_n v \quad (a.2)$$

donde  $K_b$  es un coeficiente que depende de la inducción en el entrehierro y del efecto de borde.

De acuerdo a la distribución de las bobinas del estator, al final de los pasos polares sólo existe la mitad del número de alambres comparado con los otros. Así, en estas partes, la inducción magnética es la mitad que en las partes medias del devanado. Y si el empuje por polo ( $F_p$ ) depende de la corriente y el campo, entonces la relación entre los empujes viene dada por

$$F_f = 0.25F_p \quad (a.3)$$

Luego el empuje total en el estator sale como

$$F_T = (2)(0.25F_p) + (2P-2)F_p \quad (a.4)$$

$$F_T = (2P-1.5)F_p \quad (a.5)$$

Este empuje será producido por la superficie del estator; entonces, la longitud efectiva del hierro será:

$$L_n = (2P-1.5)p \quad (a.6)$$

Así mismo nos queda que  $L_n = K_p L_f$ , donde  $K_p$  es el factor de reducción para tomar en cuenta el fin de los polos. Este factor tiene valores mayores a 0.8 -que ya es bueno- cuando  $p$  es mayor a 4.

A lo largo del hierro del estator, el campo magnético cubre una superficie más ancha que el núcleo; es decir que se puede utilizar un valor efectivo dado por  $b_{xf} = b_n + 0.7h$ . Luego el empuje estará dado por  $F_p = K_b b_{xf} L_n$ .

### GLOSARIO DE SIMBOLOS

$A_e$	Area transversal del circuito eléctrico.
$A_m$	Area transversal del circuito magnético.
$a_R$	Aceleración de la máquina real.
$b_n$	Ancho del núcleo magnético.
$B_n$	Inducción magnética en el núcleo.
$b_{xf}$	Ancho efectivo del núcleo de hierro.
$\cos\theta$	Factor de potencia.
$\delta$	Profundidad de penetración.
$\delta_E$	Penetración en el modelo a escala.
$\delta_R$	Penetración en la máquina real.
$E$	Voltaje inducido.
$f_E$	Frecuencia para el modelo a escala.
$F_f$	Empuje en el final del polo.
$F_p$	Empuje por polo.
$F_R$	Empuje en la máquina real.
$f_R$	Frecuencia de operación real.
$F_T$	Empuje total en el estator.
$G$	Factor de bondad de la máquina.
$h$	Longitud de entrehierro.
$H_h$	Campo magnético en el entrehierro.
$H_n$	Campo magnético en el núcleo.
$h_R$	Longitud de entrehierro en la máquina real.
$K_I$	Factor de escala de corriente.
$K_L$	Factor de escala de dimensión.
$K_N$	Factor de escala de número de vueltas.
$K_p$	Factor de reducción.
$\lambda$	Longitud de onda.
$\lambda_E$	Longitud de onda en el modelo a escala.
$L_e$	Longitud media del circuito eléctrico.
$L_f$	Largo físico del hierro.
$L_m$	Longitud media del circuito magnético.
$L_n$	Longitud efectiva del núcleo.
$\lambda_R$	Longitud de onda en la máquina real.
$\mu$	Permeabilidad magnética.
$\mu_E$	Permeabilidad en el modelo a escala.
$\mu_R$	Permeabilidad en la máquina real.
$m_R$	Masa del vehículo real.
$\eta$	Eficiencia.
$P$	Número de polos.
$p$	Paso polar.
$P_{iE}$	Potencia de entrada en el modelo.

- s Deslizamiento.
- $\sigma_E$  Conductividad en el modelo a escala.
- $\sigma_R$  Conductividad en la máquina real.
- $t_L$  Espesor de la lámina del secundario.
- $v_E$  Velocidad del modelo a escala.
- $V_E$  Voltaje de operación del modelo.
- $v_R$  Velocidad de la máquina real.
- $V_R$  Voltaje de operación de la máquina real
- $Z_E$  Impedancia en el modelo.
- $Z_R$  Impedancia en la máquina real.

#### 5.- REFERENCIAS

1. C. BECERRA, "Hacia la Proyección de un Magnebus para La Prosperina", Rev. Poligra 80-81, ESPOL, Marzo de 1981.
2. S. KALSI, et al, "Calculation of System Fault Currents due to Induction Motors", Proc. IEE, 118, 1, 1971.
3. T. HAMMONS y A.J. PARSONS, "Design of a Micro-Alternator for Power System Stability Investigations", Proc. IEE, 118, 10, 1971.
4. E.R. LAITHWAITE, "Finding the Best Machine to do the Job", tomado del libro Exciting Electrical Machine, pp. 44-50.
5. E.R. LAITHWAITE, "The Goodness of a Machine", Proc. IEE, 112, 3, 1965.
6. E.R. LAITHWAITE, Linear Electric Motors, Mills & Boon Ltd., Londres, 1971.
7. D. LOWTHER y E. FREEMAN, "Electromagnetic Scale Models of Linear Induction Motors", Linear Elect. Mach. Conf. Pub., n. 120, Whitefriars Press, 1974.
8. H. CARBO G., Diseño y Modelaje de un Motor Lineal de Inducción para Propulsión Magnética de un Vehículo, Tesis de Grado, Dpto. de Ing. Eléct., ESPOL, Noviembre de 1981.
9. P.G. SIMS, The Steady-State Performance of the Linear Induction Motor, Dpt. of Electronic & Elect. Eng., Univ. de Birmingham, 1967.
10. P.J. SMITH, Linear Induction Motor, Dpt. of Electronic & Elect. Eng., Univ. de Birmingham, 1966.
11. M.G. RESIN, et al, "Some Aspects of the Linear Motor's Design and Application", Linear Elect. Mach. Conf. Pub., n. 120, Whitefriars Press, 1974.

tromagnética para la Agricultura. Paradoja en Cilindros Magnetizados, Proyección de un "magnebus" y algunos Aspectos sobre la Interacción de la Radio-frecuencia en Silos de Granos Cargados Electrostaticamente. Desde 1976, es Director de la revista "TECNOLOGICA", órgano oficial de difusión científica de la ESPOL. Actualmente es Coordinador del Area de Electrónica en el Departamento de Ingeniería Eléctrica, donde da cátedras sobre electromagnetismo, electrónica y materiales



BERMUDEZ, GUSTAVO. Magister en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Técnica "Federico Santa María", (Valparaíso Chile). 1974. Trabajó sobre Ruido Magnético en Motores Monofásicos de Inducción. Entre 1980-81 asistió a cursos de perfeccionamiento en Máquinas Eléctricas en varios centros de enseñanza de Gran Bretaña. En el carácter profesional, ha sido asesor de la fábrica Andina de Transformadores (1975). Entre 1977 y 1978 fue Director en la ejecución local del Plan Nacional de Electrificación Rural. Grupo Costa. Fue Coordinador del Area de Potencia del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la ESPOL. Actualmente labora en las cátedras de Máquinas Eléctricas, teoría y laboratorio.

#### Discusión

TOAPANTA, MILTON. E.P.N. Felicidades a los autores por tratar un tema de interés actual y novedoso dentro de nuestro medio. Tal como lo manifiestan los autores, es un trabajo que será completado con la construcción de un modelo experimental.

Con relación al tema se presentan tres ecuaciones para determinar el "Factor de Bondad". La primera (Número 1 del artículo), está expresada en función de la frecuencia, de la permeabilidad, de la conductividad eléctrica, de las áreas transversales de los circuitos; la segunda (Número 2 del artículo), está en función del paso polar, de la resistividad superficial del secundario, de la longitud del entrehierro, de la frecuencia y de la permeabilidad y, la tercera (Número 3 del artículo) en función de la longitud de onda y de la profundidad de penetración. Como se podrá notar las tres ecuaciones tienen parámetros diferentes y que tratándose de diseño se podría adaptar adecuadamente la ecuación (1), por ejemplo para evaluar el "Factor de Bondad". Por consiguiente, ¿Por qué se seleccionó la ecuación 3 del artículo para los propósitos del trabajo?. Además, podrían los autores ampliar la utilización de las ecuaciones (1) y (2).

En la Tabla I, se muestra una lista de parámetros cuyos factores de escala han sido obtenidos a partir de  $K_1$ ,  $I_1$  y  $K_2$ . ¿Podrían los autores especificar como se hallan los valores asumidos para el paso de la máquina real a la máquina modelo?.

En el punto "Cálculos del parámetro del modelo", en la parte del cálculo del paso polar, ¿Por qué no se consideró el deslizamiento?. Así mismo, en la parte que corresponde al entrehierro, se ha seleccionado un factor de relación  $P_p/h_p = 12.5$ , cuando se utiliza aluminio en el secundario, indicando además que la experiencia demuestra que esa relación debe ser menor a 50. ¿Podrían los autores ampliar este criterio de relación?. También es interesante el conocer cuáles son las dimensiones del motor lineal de laboratorio que resultó. Las características de arranque en lo que se refiere a la velocidad de arranque y velocidad de frenado, así como también el tipo de frenado que se ha previsto para el diseño propuesto.

BECCERRA, CARLOS. Master en Ingeniería Eléctrica en el Instituto Politécnico Rensselaer (N.Y.), 1975. Ha publicado trabajos sobre Diodos de Avalancha de Plásmas Atrapado, Diodos pnpn para Láseres, Realimentación con Elementos Activos para Conmutación, Modelación con estructura  $p^+ - n - n^+$ . Sus trabajos específicos sobre electromagnetismo versan sobre Disipación de Calor en Alimentos a UHF, Fundamentos y Planteamientos sobre la Acción de la Energía Elec

