

Diseño y construcción de un motor de inducción lineal

Linear induction motor. Design and construction

JOSÉ DANILO RAIRÁN ANTOLINES

Ingeniero electricista y magíster en Automatización Industrial, Universidad Nacional de Colombia. Docente en el programa de Tecnología en Electricidad de la Facultad Tecnológica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Director del grupo de investigación en levitación magnética, avalado por la misma Universidad.
drairan@udistrital.edu.co

JOSÉ ROBERTO BEDOYA SALAMANCA

Tecnólogo electricista, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Integrante del grupo de investigación en levitación magnética en calidad de auxiliar de investigación. Estudiante de Ingeniería en Distribución y Redes Eléctricas en la misma Universidad.
robertobedoyasalamanca@yahoo.com.es

ALEXÁNDER RODRÍGUEZ GARCÍA

Tecnólogo electricista de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Integrante del grupo de investigación en levitación magnética en calidad de auxiliar de investigación. Estudiante de Ingeniería en Distribución y Redes Eléctricas en la misma Universidad.
AlexanderRorGar@hotmail.com

Fecha de recepción: abril 16 de 2004.

Clasificación del artículo: Investigación.

Fecha de aceptación: junio 30 de 2004

Palabras clave: motor de inducción lineal, sistema de propulsión, levitación magnética, diseño de motores lineales.

Key words: linear induction motor, propulsion subsystem, magnetic levitation, linear motor design.

RESUMEN

El presente artículo resume el procedimiento de diseño y construcción de un motor de inducción lineal. Inicialmente se realiza la sustentación teórica del principio de funcionamiento y el modelo eléctrico asumido, luego se explican las generalidades del programa de diseño hecho en Matlab, y se muestran las pruebas experimentales que ratificaron el procedimiento de diseño elegido, y el modelo seleccionado. Se concluye afirmando que este tipo de máquina es económica y fácil de construir, aunque su eficiencia es notoriamente baja.

ABSTRACT

This article summarizes the procedure for the design and construction of a linear induction motor. At the beginning, a theoretical support of the functioning principle and the electric model assumed is presented; subsequently, the generalities of the design program made in Matlab are explained and the experimental tests that ratified the design procedure selected as well as the selected model are shown. To conclude, it is affirmed that this type of machine is economic and easy to construct, although its efficiency is notoriously low.

1. Introducción

El objetivo principal del primer proyecto ejecutado por el Grupo de Investigación en Levitación Magnética fue la construcción de una banda transportadora con accionamiento magnético para aplicación industrial (Rairán, 2003a,11). Como

cualquier sistema de transporte basado en la levitación magnética, la banda cuenta con tres subsistemas fundamentales, a saber: propulsión –encargada de desplazar el vehículo–, estabilización –de mantenerlo sobre la pista– y levitación –lo mantiene en el aire magnéticamente–.

Actualmente el grupo de investigación trabaja en la optimización de cada uno de los subsistemas que conforman la banda. En particular, se quieren evitar algunos inconvenientes que presentó el motor sincrónico lineal construido inicialmente, además de buscar otras alternativas, de tal forma que pueda tenerse el criterio suficiente para determinar cuál es el tipo de motor más adecuado para desplazar el vehículo. Aunque el motor sincrónico presentó excelente comportamiento electromecánico, su costo de implementación y mantenimiento fue demasiado elevado, dado que requiere un núcleo devanado a todo lo largo del recorrido del vehículo (Rairán, 2003, 73).

En este artículo se presenta la primera alternativa de optimización desarrollada por el grupo; se trata de un motor de inducción lineal. Se seleccionó este tipo de motor porque únicamente requiere devanado dentro del vehículo, esperándose con ello que el sistema en su conjunto sea más económico y viable de implementar en Colombia. Se muestra el proceso de diseño llevado a cabo, las razones por las que se escoge un modelo eléctrico para simular el comportamiento de la máquina, el proceso de construcción y, finalmente, algunas mediciones experimentales que confirman las suposiciones iniciales. El funcionamiento de esta máquina señaló la posibilidad de probar alternativas como: motor de inducción lineal de doble devanado, motor de inducción con primario y secundario devanado, entre otras (Kosow, 1993, 436); el estudio de cada una enriquecerá los conocimientos que en el país se tienen en cuanto a máquinas eléctricas.

2. Principio de funcionamiento

Para comprender cómo pueden cumplirse las condiciones de funcionamiento de la máquina se definirán sus dos partes principales: primario y secundario. El primario o parte activa es el componente que se desplaza y contiene el devanado generador de flujo magnético, $\Phi(t)$, encargado de inducir el voltaje requerido para realizar el movimiento deseado. El secundario es la parte pasiva, llamada así porque toda la energía con que cuenta es transferida desde el primario; físicamente corresponde a la pista por donde el vehículo se mueve.

Sabiendo que la máquina real cuenta con un devanado trifásico equilibrado y que las expresiones electromagnéticas completas pueden ser complicadas, se asumirá un análisis por fase, como se muestra en adelante. Mediante

la ley de Ampère, se sabe que la fuerza magnetomotriz, f_{mm} , producida por una corriente, I , que circula por un conjunto de N vueltas en una fase, tiene forma cuadrada (Cathey, 2002, 326); sin embargo, se tendrá en cuenta únicamente la componente sinusoidal fundamental, debido a que así se reduce aún más la dificultad de los cálculos y se comete un error apenas cercano al 2% (Bedoya y Rodríguez, 2004, 89). Así:

$$f_{mm}(x) = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{N \cdot I}{2} \cos\left(\frac{\pi}{\tau} \cdot x\right) \quad (1)$$

Esta expresión presenta únicamente la variación espacial para la fuerza magnetomotriz. En (1) el factor $(4/\pi)/2$ es causado por la descomposición de *Fourier* cuando se toma $f_{mm}/2$ como amplitud de la señal cuadrada; adicionalmente, π/τ es una constante que relaciona 180° mecánicos con la distancia que ocupa un polo magnético, la cual es denotada por τ ; finalmente x es la distancia, dada en radianes.

Si se tiene en cuenta el efecto que la fuerza magnetomotriz ejerce sobre el secundario a una distancia g –conocida como entrehierro–, se habrá calculado cuál es la intensidad de campo magnético, H , como muestra la siguiente expresión:

$$H_{fase}(x) = \left[\frac{4}{\pi} \cdot \frac{N \cdot I}{2 \cdot P} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{\tau} \cdot x\right) \right] \cdot \frac{1}{g} \left[\frac{A}{m} \right] \quad (2)$$

En (2) P es el número de pares de polos. De esta forma se ha calculado la intensidad de campo magnético producido por una única fase, H_{fase} . Ahora se tomará únicamente la magnitud de esta intensidad, expresada como densidad de campo, B_{fase} , lo cual se logra introduciendo el concepto de permeabilidad magnética, μ , que es una propiedad del material que conforma el camino para el campo (Staff, 1981, 23).

$$|B_{fase}| = \mu \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{I \cdot N}{2P \cdot g} \quad [T] \quad (3)$$

Dado que la disposición del devanado es trifásica, la corriente de cada fase tiene una forma senoidal, dependiente del tiempo. Para relacionar estas variaciones y facilitar su escritura se tendrá en cuenta que la distribución espacial es senoidal; luego puede escribirse como coseno o seno, seleccionando un punto en el cual la distribución mecánica y eléctrica coincidan. Éste puede ser $t = 0$, cuando $i_2 = 0$; por tanto, el campo sobre la superficie del devanado debe ser cero, coincidiendo así las distribuciones espacial y temporal. Según estas consideraciones resulta:

$$\bar{B}_1(t, x) = B_{m\acute{a}x} \cdot \text{sen}\left(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \text{sen}\left(\frac{\pi}{\tau} \cdot x - \frac{2\pi}{3}\right) \quad [T] \quad (4a)$$

$$\bar{B}_2(t, x) = B_{m\acute{a}x} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \cdot \text{sen}\left(\frac{\pi}{\tau} \cdot x\right) \quad [T] \quad (4b)$$

$$\bar{B}_3(t, x) = B_{m\acute{a}x} \cdot \text{sen}\left(\omega \cdot t + \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \text{sen}\left(\frac{\pi}{\tau} \cdot x + \frac{2\pi}{3}\right) \quad [T] \quad (4c)$$

$B_{m\acute{a}x}$ corresponde a la densidad de campo sobre la superficie del devanado. Sumando los campos descritos por las ecuaciones (4a), (4b) y (4c), se halla la densidad de campo total en el primario, conocida como onda viajera:

$$\bar{B}_{total}(t, x) = 1,5 \cdot B_{m\acute{a}x} \text{sen}\left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{\tau} \cdot x\right) \quad [T] \quad (5)$$

Esta ecuaci3n representa el concepto m1s importante en el funcionamiento de la m1quina, consistente en una onda senoidal que viaja por el primario formando polos magn3ticos que se desplazan dependiendo de las dimensiones f1sicas del primario y de los par1metros de alimentaci3n el3ctrica del devanado.

Para hallar la velocidad de desplazamiento de la onda viajera se observa la distancia que 3sta recorre en un per1odo mec1nico (2τ) y el tiempo en que hace este recorrido; este tiempo es igual al per1odo de la se1al el3ctrica y su inverso es la frecuencia el3ctrica f , como lo expresa (5).

$$vel(t) = 2 \cdot \tau \cdot f(t) \quad \left[\frac{m}{s}\right] \quad (6)$$

De esta manera queda demostrado que una disposici3n adecuada de conductores, alimentados por un sistema trif1sico de corrientes, produce una combinaci3n de polos magn3ticos que cambian con el tiempo y se desplazan por el primario de la m1quina.

Cuando se activa la m1quina, luego del reposo, aparece un conjunto de polos que se desplazan por el primario con velocidad $2\tau f$; esto hace que se induzca voltaje sobre el secundario, como lo muestra la ley de Faraday (Johnk, 1975, 293):

$$e(t) = -\frac{d\Phi(t)}{dt} [V] \quad (7)$$

En (7), $\Phi(t)$ corresponde a la densidad de flujo en el primario multiplicada por el 1rea sobre la que act1a esta

densidad. La variaci3n ser1 m1xima cuando el veh1culo est3 en reposo y se energice el devanado, debido a que la diferencia de velocidades entre primario y secundario ser1 m1xima. El voltaje inducido generar1 una distribuci3n de corrientes en el secundario que relacionada con la densidad de campo dada por (5) generar1 la fuerza que produce movimiento, de acuerdo con la ley de Lorentz (Krauss y Feisch, 2000, 94).

El aumento de velocidad no puede llegar hasta la velocidad de la onda viajera, dado que en ese instante la variaci3n de campo que ver1 el secundario ser1 nula y la inducci3n se har1a cero, haciendo que no se produjera m1s fuerza y que el veh1culo disminuyera su velocidad; as1, siempre existir1 una diferencia de velocidad entre el campo del primario y el veh1culo mismo, conocida como deslizamiento. 3sta es la principal diferencia entre los motores de inducci3n y sincr3nico; otra diferencia es que en los motores de inducci3n la fuerza de arranque normalmente es mayor que el peso de la m1quina, haciendo que se pueda arrancar a plena frecuencia y no a frecuencia reducida, como requiere uno sincr3nico.

3. Circuito equivalente de la m1quina

Siguiendo un proceso causa-efecto se puede comenzar por la energ1a el3ctrica de entrada. Una parte de 3sta se gasta para alimentar las p3rdidas resistivas del devanado (R_1) y el resto es transformado en energ1a magn3tica en la reactancia (X_1). Esta energ1a es transferida al secundario y se puede tratar como la ca1da de tensi3n en una reactancia (X_m), la cual depende del entrehierro del motor, convirti3ndose 3sta en la p3rdida m1s importante para los motores lineales. La energ1a que alcanza el secundario es utilizada para generar corriente sobre la l1mina de aluminio, es decir, se produce otra p3rdida resistiva (sobre R_2). La energ1a que a1n queda es utilizada para realizar trabajo mec1nico: alimentar el movimiento, la fricci3n y otro tipo de p3rdidas llamadas miscel1neas.

- *Resistencia del primario (R_1):* depende de los siguientes par1metros f1sicos: factor de distribuci3n, K_w , n1mero de fases, m , cantidad de ranuras, S , resistividad del conductor, ρ_{cu} , ancho del n1cleo, l , 1rea de la secci3n del conductor, A , y h que es la altura del diente. La expresi3n general para este elemento es:

$$R_1 = 2 \cdot \rho_{cu} \cdot \frac{\ell + \sqrt{\tau^2 + \left(\frac{h}{2}\right)^2}}{A} \cdot K_w \cdot N \quad [\Omega] \quad (8)$$

- *Reactancia del primario (x_1):* se halla sumando las intensidades de campo parciales de cada lado de una

espira en una bobina. Su magnitud depende de la frecuencia eléctrica, f , del paso polar, τ , la longitud axial, l , y del radio del conductor, r_{cu} (Alvarado y Salamanca, 2003, 13).

$$X_1 = \left(\frac{S}{m} N^2 \right) \cdot \frac{\mu_o}{\pi} \cdot \left[\tau \cdot \ln \left(\frac{\ell}{r_{cu}} \right) + \ell \cdot \ln \left(\frac{\tau}{r_{cu}} \right) \right] \cdot 2\pi f \quad [\Omega] \quad (9)$$

- *Reactancia de magnetización (X_m)*: corresponde al valor de la inductancia del polo, vista desde la longitud del entrehierro. Es tal vez el parámetro que influye más en el comportamiento de la máquina, siendo inversamente proporcional al entrehierro, g . (Nasar, 1976, 205).

$$X_m = \left(\mu_o \cdot \frac{S}{m} \cdot \frac{\tau \cdot \ell}{g} \cdot (K_f \cdot N)^2 \right) \cdot 2\pi f \quad [\Omega] \quad (10)$$

- *Resistencia del secundario (R_{sec})*: para su cálculo se tiene en cuenta que el material conductor es aluminio. R_{sec} también depende del valor de los parámetros constructivos del primario, y de la velocidad relativa entre la onda viajera y la del motor, conocida como deslizamiento, d . (Nasar, 1976, 208).

$$R_{sec} = \frac{S}{m} \rho \frac{\ell}{\tau} (K_w N)^2 \cdot \frac{1}{d} \quad [\Omega] \quad (11)$$

Para representar la resistencia del secundario se utiliza un artificio matemático que la divide en dos partes: una representa la pérdida en el aluminio (R_2), constante; la otra corresponde a la fracción de potencia eléctrica convertida en potencia mecánica (véase figura 1); ésta depende de la velocidad de la máquina [$R_2 \cdot (1-d)/d$].

Para finalizar, el modelamiento se refiere la resistencia de secundario al primario; en este caso, la relación de transformación, a , cuenta con un número equivalente de vueltas del devanado primario a una única vuelta que se supone se forma en el secundario.

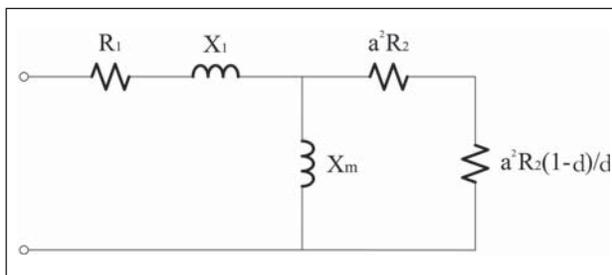


Figura 1. Circuito equivalente del motor de inducción lineal por fase

El circuito eléctrico equivalente se realizó con el fin de obtener un modelo del motor de inducción lineal, que permitiera predecir el comportamiento de la máquina real y observar la influencia de la variación de parámetros electromecánicos en su funcionamiento. El paso siguiente fue implementar el modelo utilizando código para Matlab.

4. Programas para el diseño del motor

El diseño del motor está basado en el desarrollo de varios de los programas que realizan los cálculos requeridos para el análisis de la máquina. Éstos están divididos en tres secciones: a) simulación del comportamiento de la máquina expuesta a una rampa de velocidad; b) selección del punto de operación nominal de la máquina, y c) determinación de las características constructivas de la máquina (Bedoya y Rodríguez, 2004, 39-66). En la figura 2 se presenta el diagrama de flujo que establece la secuencia básica para el diseño del motor.

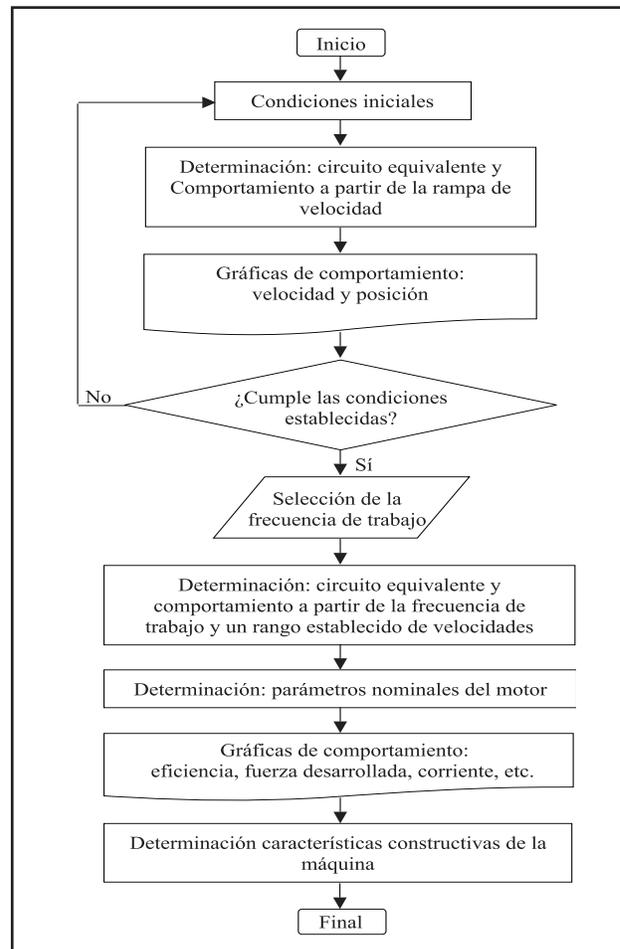
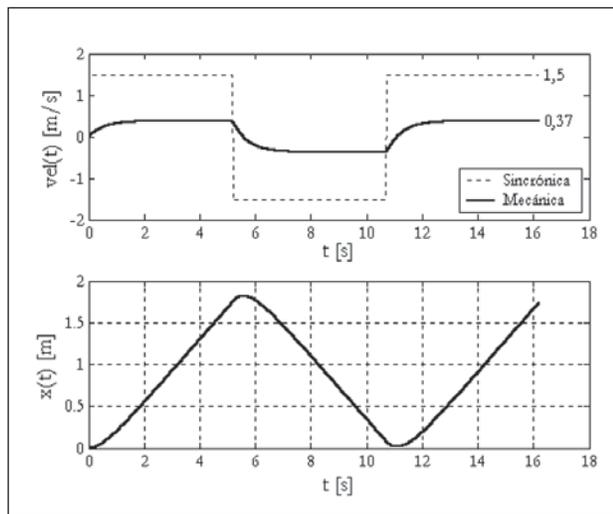


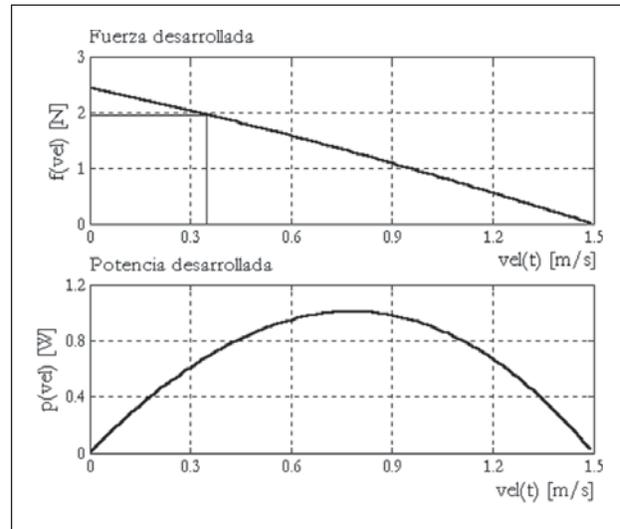
Figura 2. Secuencia de diseño del motor

En la figura 3 se muestra el resultado de una simulación del comportamiento de la máquina a 10 Hz; puede observarse que la fuerza desarrollada durante el arranque es máxima y disminuye casi de manera lineal hasta la velocidad de la onda viajera (1,5 m/s). La curva de potencia desarrollada comienza en cero, dado que en ese punto el vehículo no se mueve; termina también en cero porque en ese momento no hay energía eléctrica que alimente el consumo mecánico, como puede deducirse del valor de la resistencia, $R_2 \cdot (1-d)/d$, con d igual a cero. Esta curva tiene un punto máximo determinado por la reactancia de magnetización, el cual se presentará a diferentes velocidades, dependiendo de la frecuencia de alimentación de la máquina.

Lo ideal es que el máximo de la curva de potencia se presente muy cerca de la velocidad sincrónica, porque este punto se toma como la condición nominal de la máquina; sin embargo, no puede ser tan grande como se quisiera considerando que la dimensión de la pista restringe el tiempo disponible para llegar a él; de esta forma, existe una relación entre el valor máximo de frecuencia de entrada y el punto de operación de la máquina. La curva de eficiencia tiene una forma exactamente igual a la curva de potencia desarrollada, debido a que la potencia de entrada es prácticamente constante. El valor tan bajo de potencia mecánica se debe a varios factores, especialmente al valor del entrehierro y la longitud de la pista; longitudes mayores permitirán frecuencias de entrada mayores (por tanto reactancias de magnetización diferentes), velocidades mayores y, finalmente, una mayor potencia; entrehierros menores disminuyen sustancialmente las pérdidas, es decir, hacen que la eficiencia aumente.



a)



b)

Figura 3. Curvas de desempeño del motor a 10 Hz. a) Comportamiento en función del tiempo para la velocidad y la posición; b) fuerza producida y potencia mecánica en función de la velocidad

5. Construcción de la máquina de inducción lineal

Como ya se había mencionado, el prototipo consta de dos partes: el vehículo y el secundario. El vehículo está formado por el devanado primario, una estructura en acrílico y cuatro ruedas que lo soportan. El secundario está formado por dos materiales, uno ferromagnético para aumentar el campo que produce el primario, y otro en aluminio, debido a que éste es buen conductor para la corriente, la cual es generada por la inducción de voltaje.

El diseño del vehículo permite que el núcleo del devanado se sujete en cada extremo por tornillos, de tal forma que pueda variarse el entrehierro de la máquina; así, la altura del carro con respecto a la pista no varía, pero la altura del núcleo a la pista sí, como se observa en la figura 4.

La construcción del devanado primario se basa en la misma teoría para la conexión de los estatores de máquinas rotatorias (Viet Nam, H., 2003, 5). En este caso se seleccionó un devanado imbricado excéntrico corona con 24 ranuras, seis de ellas por polo (correspondientes a 7,3 cm) y dos bobinas por grupo fase, por lo cual se crean cuatro polos individuales. El diagrama de conexión se muestra en la figura 5.

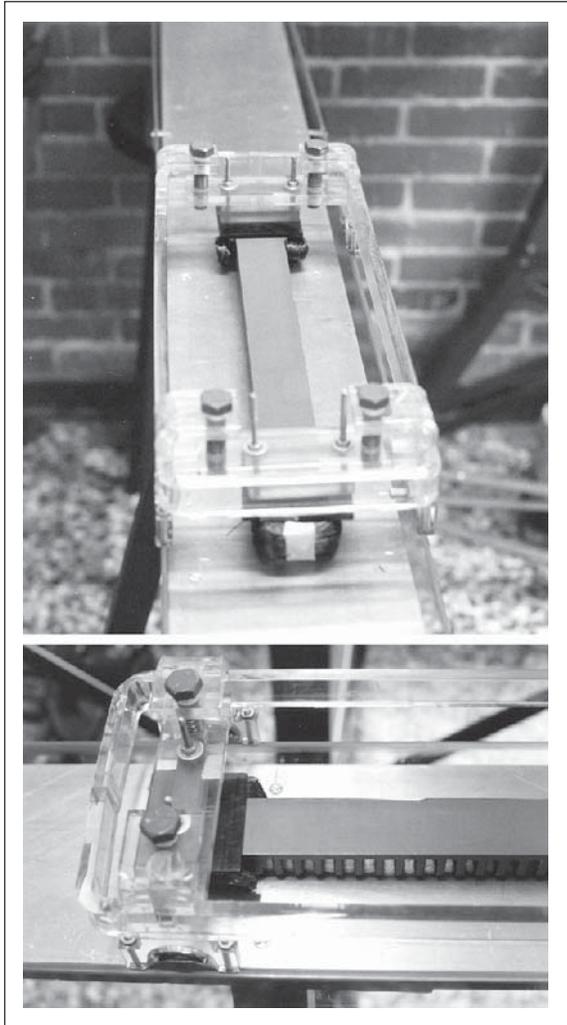


Figura 4. Vehículo del motor con dos bobinas del devanado primario

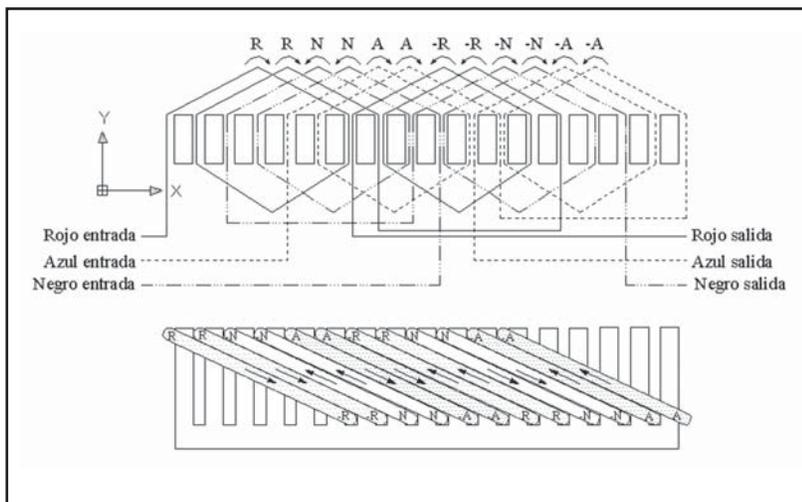


Figura 5. Diagrama de conexión de parte del devanado primario

El aislamiento de las bobinas se realizó arrollándolas completamente con cinta de fibra de vidrio. Luego de aislarse se instalaron en el núcleo utilizando separadores ajustados a las ranuras con silicona.

6. Medición de los parámetros físicos del motor

Para verificar los resultados obtenidos con las simulaciones se desarrollaron montajes para realizar las mediciones de las variables relativas al funcionamiento de la máquina (fuerza, velocidad y eficiencia, entre otras). Ellas son descritas a continuación, mostrando los resultados obtenidos.

6.1 Fuerza

Para medir la fuerza desarrollada por el vehículo se unen los dos extremos de un dinamómetro, como indica la figura 6. La fuerza que se mida es la de arranque del motor, dado que la velocidad es cero y por tanto la fricción dinámica y la inercia permanecen inactivas, de acuerdo con el diagrama de fuerzas de esa figura.

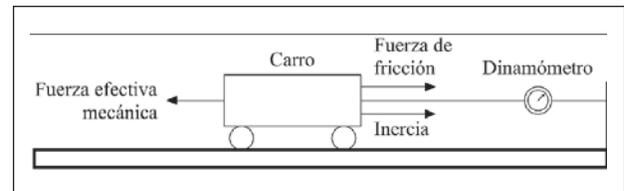


Figura 6. Diagrama de fuerzas actuantes sobre el vehículo

La medición de la fuerza se hizo alimentando el sistema polifásico a 10 Hz y 50 V, resultando 2,35 N.

6.2 Velocidad

Se obtuvo haciendo que el vehículo se desplazara entre un par de puntos sobre la pista e instalando un sensor óptico (Banner: OPBT3) para medir la posición, utilizando las tarjetas de National Instruments 6023E y PCI-6711 y el programa Labview 6.i ®. El resultado fue una curva como la presentada en la figura 7; ella representa el vehículo en uno de sus recorridos, desde el momento en que prácticamente está a velocidad máxima positiva, luego cuando se detiene y cambia de sentido de giro, hasta que casi encuentra su máximo de velocidad negativa.

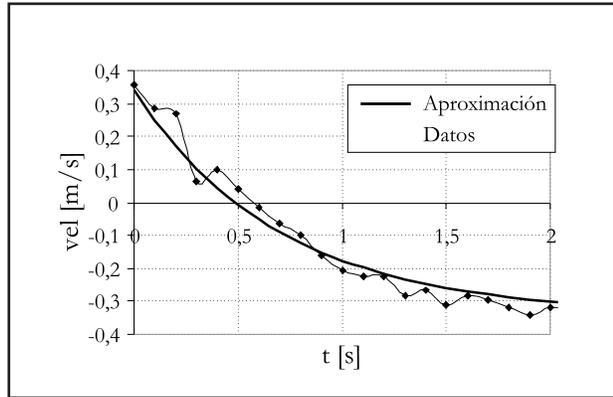


Figura 7. Comportamiento de velocidad

El comportamiento de velocidad que más se ajusta a los puntos de la curva en la figura 7 se obtiene a partir de la aplicación de la ecuación (12).

$$V(t) = 2 \cdot V_{m\acute{a}x} \left(1 - e^{-t/\tau} \right) - V_{m\acute{a}x} \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad (12)$$

$V_{m\acute{a}x}$ es 0,35 m/s, y corresponde a la velocidad máxima cuando el sistema es alimentado a 10 Hz y 50 V; esto quiere decir que el deslizamiento es de 0,76 (bastante alto), debido en su mayoría al rozamiento; éste es uno de los puntos en que puede trabajarse más, si se quiere optimizar el diseño. La constante de tiempo, τ , es 0,7 s; este valor está relacionado con el tiempo que toma el motor para alcanzar una velocidad estable, luego de un cambio de voltaje de alimentación.

6.3 Potencia mecánica

Su medida implica la medición de la velocidad instantánea y la fuerza mecánica que la produce. Debido a que el grupo de investigación no cuenta con la instrumentación suficiente para medir estas dos variables durante la operación de la máquina, se recurrió a realizar aproximaciones a partir de datos ya tomados en pruebas anteriores.

Para el dato de velocidad se tomó la encontrada en la sección anterior, es decir, 0,35 m/s, considerada como nominal. Para la medida de la fuerza se aprovecha la linealidad que presenta la curva fuerza-velocidad (véase figura 3), suponiendo como fuerza máxima 2,35 N, que es la medida experimental tomada con el dinamómetro. De esta manera, la fuerza a 0,35 m/s será 1,8 N. Realizando el producto velocidad y fuerza se encuentra la potencia mecánica, que resulta en 0,63 vatios.

6.4 Potencia eléctrica

Para su cálculo se tomaron las lecturas de voltaje y corriente entregadas por el variador de velocidad que alimenta el motor (Micromaster Vector. Siemens, 3HP, 3 ϕ , 220 V); adicionalmente se determinó el factor de potencia empleando la siguiente ecuación:

$$Fp = \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{X_1}{R_1} \right) \right] \quad (13)$$

En (13) R_1 es medida utilizando el método tensión-corriente, y X_1 a partir de las relaciones fasoriales que resultan cuando se miden los voltajes en un circuito serie, conformado por la reactancia por medir, una impedancia conocida y una fuente sinusoidal dada. Conocidos estos valores, se emplea la siguiente ecuación para encontrar la potencia eléctrica:

$$P_{el\acute{e}ctrica} = \sqrt{3} \cdot V_l \cdot I_l \cdot Fp \quad [W] \quad (14)$$

El valor de la potencia eléctrica medida es de 57 vatios, deducible de los datos consignados en la tabla 2 y las ecuaciones (13) y (14). Éste es un valor muy alto al compararlo con la potencia mecánica que realmente se aprovecha (0,63 vatios), y quiere decir que las pérdidas en cada transformación de energía son excesivas. La relación entre las potencias eléctrica y mecánica define la eficiencia en el punto de operación considerado, y resulta en 1,1%.

A partir de mediciones experimentales sobre el motor, pudo comprobarse la veracidad del criterio asumido para el diseño de la máquina, es decir, tomar el flujo de potencia desde la energía eléctrica de entrada, hasta llegar a la potencia mecánica que realiza el movimiento, pasando por elementos resistivos o inductivos que representan las transformaciones de energía, junto con las pérdidas de potencia asociadas a cada transformación. Los resultados de las potencias en el sistema se resumen en la tabla 1, presentada a continuación.

Tabla 1. Relación de pérdidas en la máquina

Potencia de entrada	57 W
Pérdidas en el devanado primario	22,32 W
Pérdidas en el secundario	0,94 W
Pérdidas mecánicas	33,13 W
Potencia efectiva	0,63 W

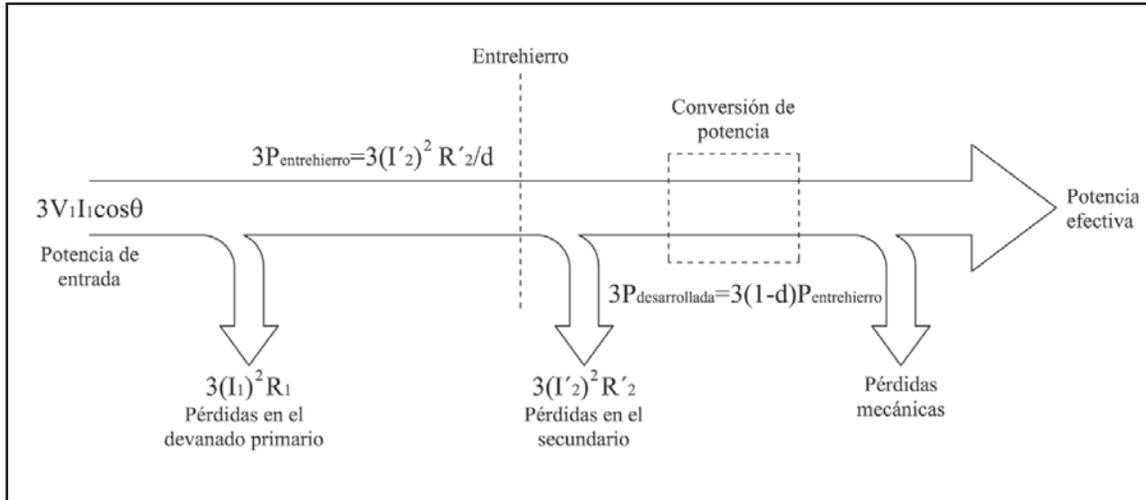


Figura 8. Flujo de potencia en el motor de inducción lineal

Para el cálculo de las potencias del devanado primario, secundario y mecánicas, se tuvieron en cuenta las relaciones que muestra la figura 8.

A manera de resumen, se presentan los valores nominales más importantes de la máquina construida (véase tabla 2); asimismo, en la figura 9 se presenta el circuito equivalente a 10 Hz, tomado de las mediciones experimentales.

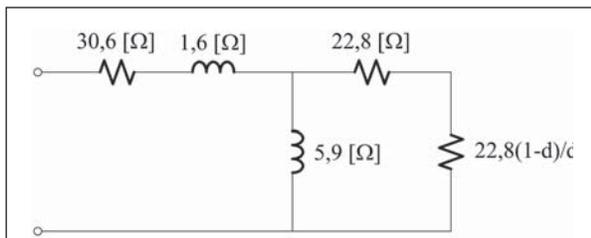


Figura 9. Circuito equivalente final

7. Conclusiones

La ejecución del proyecto de investigación planteado cumplió con su objetivo fundamental, esto es, construir un motor de inducción lineal que permitirá a futuro calcular la reducción de costos de fabricación y las mejores condiciones de funcionamiento, frente al motor síncrono lineal que también fabricó el grupo. Sin embargo, puede adelantarse que este tipo de motor es más sencillo de construir, debido a que cuenta apenas con una fracción de devanado primario, y resultará también más económico de construir, por la misma razón.

Tabla 2. Características constructivas y eléctricas del motor de inducción lineal

Paso polar	6 ranuras
Distancia polar	7,5 cm
Área del conductor	0,125 mm ²
Factor de distribución Kw	0,9
Factor de apilamiento Kf	0,35
Calibre del aluminio	3 mm
Entrehierro	6 mm
Inductancia por fase	26 mH
Resistencia por fase	30,6 Ω
Número de bobinas	24
Número de espiras por bobina	110
Número de ranuras	34
Voltaje nominal	50 V
Corriente nominal	0,7 A
Potencia de entrada	57 W
Potencia de salida	0,63 W
Frecuencia	10 Hz
Velocidad lineal	0,35 m/s
Eficiencia medida	1,1 %

Pudo verificarse experimentalmente que el principio de la transformación de energías empleando elementos resistivos e inductivos es una buena aproximación para el diseño de este tipo de máquinas; las mediciones se acercaron en más del 90% a los valores resultantes de la

simulación hecha en Matlab; sin embargo, se considera necesario el uso de herramientas más precisas, como por ejemplo elementos finitos, esto ayudaría a optimizar el diseño de esta máquina o las demás que puedan construirse a futuro.

El valor tan bajo de eficiencia puede ser mejorado aplicando varias estrategias: a) construir una pista de mayor longitud, para que el vehículo pueda llegar hasta su máxima velocidad mecánica y alcanzar la máxima

eficiencia teórica; b) la modificación presentada en a) hará que la frecuencia de alimentación pueda cambiarse, alterando todas las curvas de comportamiento debido al valor de la reactancia de magnetización; c) finalmente, es importante trabajar con la configuración mecánica del vehículo, porque gran parte de las pérdidas son causadas por el valor del entrehierro y pueden reducirse; además, por la fricción debida a la combinación de ruedas y guías en el prototipo construido.

Referencias bibliográficas

- [1] ALVARADO, J. y SALAMANCA, A. (2003) “Diseño y construcción del estator de una máquina sincrónica lineal”. Bogotá, D. C, Tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad Tecnológica.
- [2] BEDOYA, R. y RODRÍGUEZ, A. (2004). “Diseño y construcción de un motor de inducción lineal”. Bogotá, D.C., Tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad Tecnológica.
- [3] CARL, J. (1975). *Engineering Electromagnetic Fields and Wave*. New York, Ed. John Wiley & Sons.
- [4] CATHEY, J. (2002). *Máquinas eléctricas. Análisis y diseño aplicando Matlab*. 1ª ed., México D.F., Ed Mc Graw-Hill.
- [5] HATY, W. (1991). *Teoría electromagnética*. 5a. ed., Ed. McGraw-Hill.
- [6] KOSOW, I. (1993). *Máquinas eléctricas y transformadores*. México D.F., Ed. Prentice Hall.
- [7] KRAUS Y FLEISCH (2000). *Electromagnetismo con aplicaciones*. México D.F., Ed. McGraw-Hill.
- [8] NASAR, S. A. (1976). *Linear Motion Electric Machines*. New York, Ed. John Wiley & Sons.
- [9] RAIRÁN, D. (2003). “Motores sincrónicos lineales. Una experiencia de diseño y construcción”. En: *Tecnura*, No. 12, Bogotá
- [10] RAIRÁN, D. (2003a). *Levitación magnética, alternativa al transporte de pasajeros*. 1ª ed., Bogotá, Fondo de Publicaciones Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- [11] STAFFE, (1981). *Circuitos magnéticos y transformadores*. Buenos Aires, Ed. Reverté.
- [12] VIET NAM, H. (2003). “Design of a single-sided linear induction motor”. Tesis de pregrado, The University of Queensland, Australia.