

# MOTORES SINCRÓNICOS LINEALES

## Una experiencia de diseño y construcción

### DANILO RAIRÁN ANTOLINES

Ingeniero Electricista y Magíster en Automatización Industrial Universidad Nacional de Colombia. Docente de Tecnología en Electricidad de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas a partir de 1996. Director del grupo de investigación en Levitación Magnética de la Universidad Distrital F.J.C.  
drairan@coll.telecom.com.co

### JAVIER ALVARADO LÓPEZ

Tecnólogo Electricista, egresado de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Se desempeñó como auxiliar de investigación entre febrero del 2001 y diciembre del 2002.  
jal\_almanis@hotmail.com

### ALEXANDER SALAMANCA TORRES

Tecnólogo Electricista, egresado de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Se desempeñó como auxiliar de investigación entre julio del 2001 y diciembre del 2002.  
lesalama1@yahoo.com

Clasificación  
Categoría Colciencias: 1

Fecha de recepción: 21-04-2003

Fecha de aceptación: 30-05-2003

**Palabras Claves:** Motor sincrónico lineal, diseño de máquinas, sistema de propulsión lineal, levitación magnética.

**Key Words:** Linear synchronous motor, machine design, linear propulsion system, magnetic levitation.

## 1. Introducción

El Grupo de Investigación en Levitación Magnética de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas inició sus actividades en 1998 con la presentación de una propuesta para la ejecución de un proyecto de investigación, el cual fue aprobado y comenzó a ejecutarse en febrero de 1999. El objetivo fundamental del proyecto es construir una banda transportadora con accionamiento magnético para

aplicación industrial. La diferencia principal con respecto a cualquier sistema de desplazamiento de carga consiste en el uso de la levitación magnética, la cual permite que el vehículo sobre el cual se transporta la carga no envejezca, ni deba someterse a actividades de mantenimiento debidas a la fricción que origina el uso normal de ruedas y, especialmente, reduzca el consumo de energía.

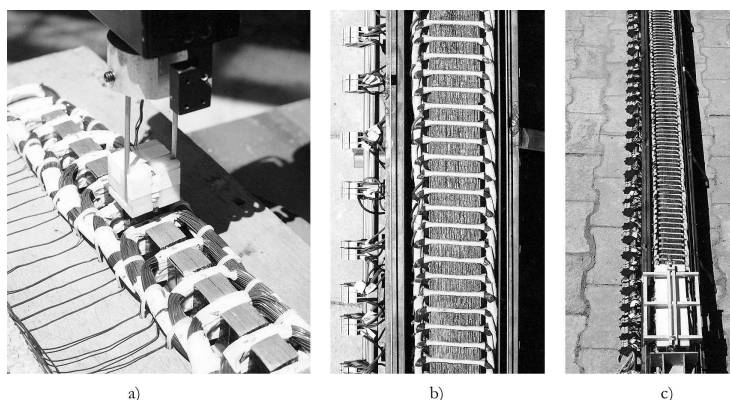
La idea original fue tomada de los sistemas de transporte alternativo de pasajeros del Japón y Alemania (Rairán, 1999b: 4), el cual cuenta con tres sistemas electromagnéticos que permiten su funcionamiento: uno de levitación (diferencia principal del sistema); uno de estabilización, que impide que el vehículo se salga de la ruta de viaje, y uno de propulsión. A este último sistema se dedicará el desarrollo del presente artículo; las alternativas posibles de solución para el desarrollo de este sistema son varias, pero las de mayor utilización son dos: usar un motor de inducción lineal o usar uno sincrónico lineal (Sinha, 1987:237).

La ventaja de seleccionar y construir un motor sincrónico lineal para la propulsión de un sistema MagLev (*Magnetic Levitation*) es que éste desarrolla una velocidad y, por lo tanto, una posición altamente controlable y predecible (Nasar, 1976: 24), además de otras ventajas que se mostrarán durante el avance del artículo. En este documento se expondrá el método utilizado para la construcción de un primer prototipo, el cual fue casi completamente experimental; posteriormente el desarrollo de una aplicación de software de diseño con la utilización de MatLab, para la sistematización de los cálculos requeridos y la inclusión de los conocimientos

empíricos del grupo en cuanto a la fabricación del motor. La aplicación de software se prueba mediante la construcción de un prototipo final; este último proceso se describe en detalle, de tal forma que otros grupos de investigación, o quien así lo requiera, puedan repetir y comprobar los resultados presentados; para finalizar, se realizan pruebas de laboratorio para determinar las características eléctricas y mecánicas del motor, entre ellas la eficiencia.

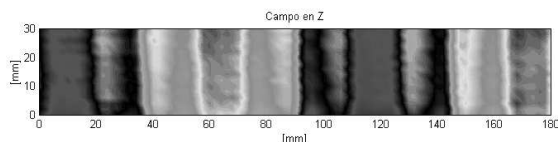
## 2. Construcción de un prototipo inicial

Una vez se comienza la construcción de un motor sincrónico lineal (MSL) se notará que son muchas las variables físicas que intervienen en su funcionamiento, especialmente cuando se quiera detallar el trabajo; se sugiere por lo tanto asumir criterios de diseño que establezcan límites a algunas de ellas. Por ejemplo, el calibre del conductor no debe superar algún calibre determinado por la capacidad del sistema de alimentación; para otras variables conviene asignar valores constantes (v. gr. devanado imbricado de doble capa), y otras no deben tenerse en cuenta, por lo menos en una etapa inicial (en este caso sucedió con la influencia de la forma del diente y ranura en el núcleo dentro de la distribución final de campo magnético).



**Figura 1.** Primer prototipo: a) Medición experimental de campo magnético, b) detalle del devanado y el núcleo, c) vista general del prototipo inicial.

La configuración de un MSL es la misma de la de una máquina sincrónica rotacional luego de extender su estator; este último queda ubicado a lo largo de la pista y el rotor es un grupo de imanes permanentes ubicados en un vehículo. Cuando el devanado del MSL es excitado por un conjunto de voltajes trifásicos, se generan campos magnéticos, que sumados en el tiempo se comportan como un conjunto de polos magnéticos norte y sur intercalados (Rairán, 1999a: 92), como se observa en la Figura 2; en ella puede verse un polo magnético con una tonalidad oscura y otro polo, gris claro.



**Figura 2.** Campo magnético del estator en el prototipo inicial.

La forma matemática en que se distribuye el campo sobre el estator está dada por:

$$B(x,t) = 1.5 \cdot B_{m\acute{a}x} \cdot (\text{sen}(\omega t)\text{cos}(x) - \text{cos}(\omega t)\text{sen}(x)) \quad (1)$$

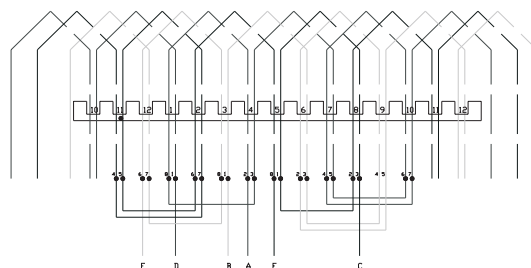
“ $B_{m\acute{a}x}$ ” es la densidad de campo máximo de una de las tres bobinas que conforman un polo magnético, “ $x$ ” representa la variación en el espacio, como la que se presenta en la Figura 2, “ $t$ ” muestra cómo cambia el campo en el tiempo, y “ $\omega$ ” es la frecuencia angular de la señal eléctrica (Rairán, 2003: 24).

Cuando un sistema trifásico alimenta el devanado estatórico, convenientemente conectado, un campo magnético se desplaza con una velocidad dada en la ecuación 2. Si se ajusta un conjunto de imanes permanentes en el vehículo, se tendrán las condiciones necesarias para que las polaridades contrarias se atraigan y las polaridades iguales se rechacen, logrando así que el vehículo se mueva a una velocidad programable mediante la frecuencia eléctrica, en este caso dada por un variador de velocidad.

$$vel(t) = 2 \cdot f_e(t) \cdot A \quad [m/s] \quad (2)$$

En (2) “ $vel$ ” es la velocidad, “ $f_e$ ” la frecuencia eléctrica de la señal que alimenta el estator, y “ $A$ ” el ancho polar.

Un paso indispensable en la construcción de un motor, es decidir la manera como se van a ubicar las bobinas en el núcleo, el tamaño de los polos magnéticos y la forma de conectar las bobinas para que cumpla con los requerimientos especificados para el desplazamiento de los polos. En la Figura 3 se observa el plano eléctrico del devanado que se construyó para el MSL.



**Figura 3.** Devanado trifásico, imbricado de doble capa.

Como resultado de esta primera fase de diseño se llegó a un prototipo inicial de 2 metros de longitud, con una capacidad de carga cercana a los 200 gramos a una velocidad máxima de 0,5 m/s. Luego de finalizar su construcción se comenzó a desarrollar un programa para la determinación del valor de los principales parámetros eléctricos y mecánicos a partir de condiciones deseadas de funcionamiento; su forma de funcionamiento, los supuestos físicos iniciales y la verificación de sus resultados mediante la construcción final del sistema se presentan en la siguiente sección.

### 3. Programa de diseño para el motor

En la Figura 4 se muestra el esquema con el cual fue desarrollado el paquete de software de diseño, empleado para definir la mayor cantidad de las variables físicas que éste pueda contener.

En la aplicación final, el usuario puede ingresar valores para las variables que allí se definen, como dimensiones físicas de la pista, características eléctricas del conductor seleccionado, parámetros de simulación, tipo de conexión y sentido de avance.

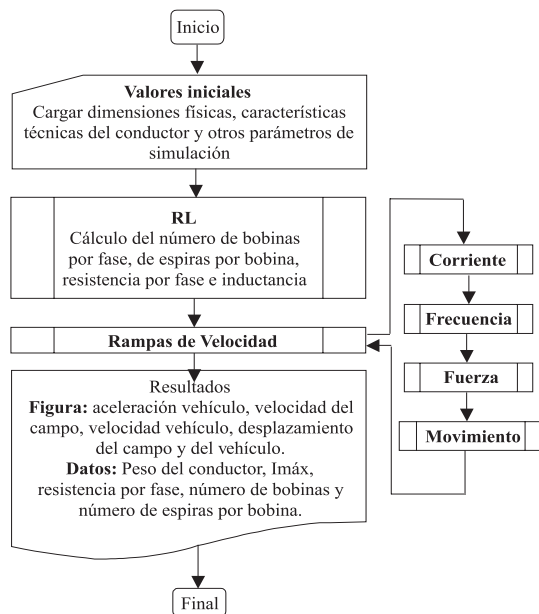


Figura 4. Diagrama de flujo para el esquema de programación.

Para hallar la resistencia estática debe conocerse la longitud del conductor empleado por fase y su valor de resistencia por kilómetro; así, bastará con reemplazar estos datos en la ecuación (3), en la cual “ $R_k$ ” es un dato del fabricante y “ $L$ ” la longitud total del conductor.

$$R = R_k \cdot L \quad [\Omega] \quad (3)$$

Para encontrar el valor de la inductancia del estator se supuso una espira rectangular con lados “ $a$ ” y “ $b$ ”, permeabilidad magnética “ $\mu_0$ ” y un radio de curvatura en las esquinas igual a “ $r$ ” (Alvarado 2003: 13); así puede encontrarse que el valor es:

$$L = N^2 \mu_0 \left( \frac{b}{\pi} \ln \left( \frac{a}{r} \right) + \frac{a}{\pi} \ln \left( \frac{b}{r} \right) \right) \quad (4)$$

Una vez se conoce la inductancia de una bobina sin núcleo, debe establecerse un factor para multiplicar su valor y determinar la inductancia con el núcleo de cremallera; para ello se realizaron las mediciones correspondientes a una bobina sin núcleo y otra con núcleo, hallándose una relación de 1:3.

Con el propósito de simular el comportamiento real de la máquina, fue necesario simular cuatro rampas de velocidad en las cuales se calcula el dato de velocidad momento a momento. Las rampas simuladas son: aceleración, velocidad constante, desaceleración y velocidad cero. La salida del variador se trabajó en modo tensión-frecuencia, por lo que fue necesario tomar una medición de la salida de tensión del variador, la cual corresponde a  $v(f) = 0,758 \cdot f + 16,7$  [V]. Conociendo el voltaje de operación en cada instante de tiempo, la resistencia, inductancia y frecuencia, se calcula la corriente instantánea.

Para establecer la fuerza del sistema se utiliza la Ley de Lorentz, expresada en la ecuación (5); en ella “ $F$ ” es la fuerza a la que se ve sometido un conductor inmerso en un campo magnético “ $B$ ”, e “ $i$ ” la corriente que circula por el conductor (Hayt, 1991: 301).

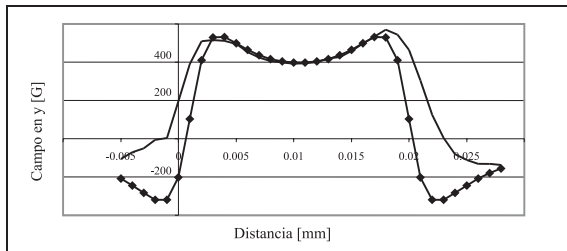
$$\vec{F} = i(\vec{l} \times \vec{B}) \quad (5)$$

Esta ley se constituye en el punto central o eje de diseño; expresa el momento en que la energía eléctrica (representada en este caso por la corriente en el estator y el campo producido por los imanes en el rotor) genera o, mejor aún, se transforma en energía mecánica, expresada como fuerza. Una vez que la fuerza interactúa con la masa, produce aceleración, velocidad y finalmente desplazamiento, que es la razón de ser de la máquina.

La intensidad de campo que produce el imán en un punto en el espacio fue calculada suponiendo que el imán se comporta como dos conductores que están alojados en su interior, por los cuales circulan corrientes con sentidos contrarios. Para

justificar esta afirmación se realizó un experimento, el cual compara la intensidad de campo producida por el imán, con la calculada si se emplea la ecuación (6). Para realizar la medición de intensidad de campo producida por el imán en el sentido vertical fue empleado un sensor de efecto Hall, tomándose muestras cada milímetro.

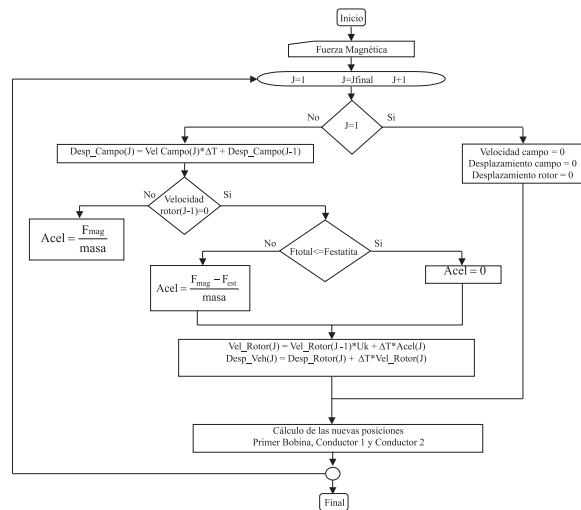
$$B = \left( \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \right) a\phi \quad (6)$$



**Figura 5.** Comparación entre el campo magnético de un imán y de dos conductores.

La curva de campo magnético del imán obtenida (línea continua) se comparó con la curva calculada (punteada), determinando que son suficientemente similares para considerarlas equivalentes. Los parámetros de la simulación se alimentan cuando los conductores imaginarios están ubicados a un milímetro del borde superior del imán y por ellos circula una corriente de 1000 y -1000 amperios. El algoritmo que calcula el desplazamiento del estator y del vehículo, así como la posición de los mismos, se observan el diagrama de flujo de la Figura 6.

El programa desarrollado entrega un conjunto de datos constructivos, entre ellos el peso del conductor, su resistencia, la corriente por fase, el número de espiras por bobina, el número de bobinas por fase y los totales; de la misma manera, presenta dos gráficas en las que muestra la posición y velocidad tanto del campo en el estator como del vehículo.



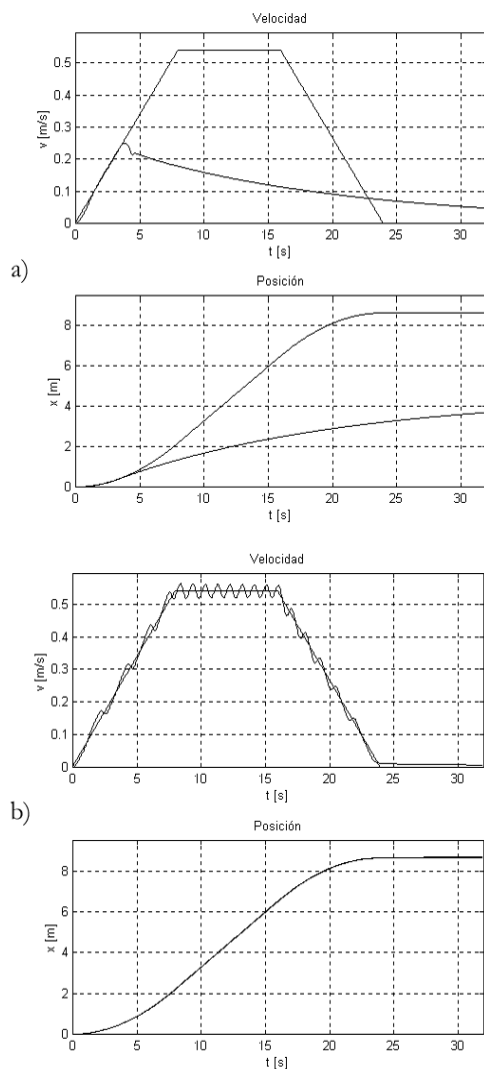
**Figura 6.** Diagrama de flujo para el cálculo del movimiento.

Tiempo de aceleración	8 [s]
Tiempo velocidad constante 8 [s]	
Tiempo desaceleración	8 [s]
Frecuencia máxima	5 [Hz]
Peso total: caso 1	80 [kg]
Peso total: caso 2	50 [kg]
Conexión	Delta

**Tabla 1.** Parámetros de simulación para la comprobación del software.

La Tabla 1 muestra los valores de algunas de las variables de entrada con que se alimentó la aplicación de software para dos cálculos con resultados diferentes; los resultados obtenidos por el programa se muestran en la Figura 7.

En la parte a) de la Figura 7 se observa el resultado de una simulación en la que el vehículo no alcanza la velocidad del campo generado en el estator; esto se debe a que la masa que transporta es mayor que la capacidad de arrastre del motor; por el contrario, en la parte b) se observa cómo la velocidad del vehículo y la del campo del estator son iguales.



**Figura 7.** Gráficas de velocidad y posición para dos condiciones simuladas. a) Peso total: 80 kg, b) peso total 50 kg.

A partir de la utilización del programa de diseño, y de los resultados que él genera se escogió el calibre del conductor, las dimensiones de las ranuras en el estator, la corriente nominal del variador de velocidad y la cantidad de bobinas, entre otros parámetros. A partir de estas definiciones, se comenzó la construcción del motor definitivo, mediante el procedimiento que se describe a continuación.

### 3. Construcción del motor sincrónico lineal

A partir de los parámetros determinados por el programa de diseño se emprendió la construcción del estator y del vehículo; para llevar a cabo esta tarea se ejecutaron una serie de pasos que definieron un proceso de construcción ordenado y claro. Las actividades fueron, en su orden: a) fabricación de los núcleos y las bobinas; b) bobinado de los electroimanes, incluyendo algunas pruebas y mediciones; c) construcción del vehículo, considerando principalmente las características magnéticas del estator; d) una vez completa la máquina, evaluación de la capacidad de arrastre y resumen de los parámetros de la máquina en una placa de características.

#### 3.1. Fabricación del estator

En esta etapa, se elaboraron los núcleos y las bobinas que conforman el bobinado. A continuación y durante cinco meses se trabajó en la construcción de los dos devanados estatóricos, cada uno de 7 m de longitud, para cada lado de la pista (ver Figura 8). El bobinado es imbricado, tipo bobina completa (Kosow, 1993: 58). En este proceso se emplearon 38 kg de cobre, un número de  $582 \times 2$  bobinas para un total de  $194 \times 2$  polos. Posteriormente, se realizó una evaluación para corroborar la integridad del devanado en cuanto a aspectos constructivos, consistente en algunas pruebas y mediciones, tales como:

- *Prueba de aislamiento:* fue realizada empleando como instrumento de medida un megóhmetro y dio como resultado el cumplimiento del ensayo de baja resistencia (continuidad) y la medición de la resistencia del aislamiento; se demostró, así, el correcto funcionamiento del esmalte aislante de las bobinas, la utilidad del anticorrosivo aplicado a los núcleos ferromagnéticos y el buen desempeño de los protectores plásticos empleados en el devanado

- *Prueba de desviación polar:* se hace necesaria debido a que los dos tramos del estator, ubicados a lado y lado de la máquina, deben generar polos a la misma distancia desde un punto de referencia dado
- *Medición de resistencia:* se realiza para verificar la veracidad de los cálculos hechos mediante el programa de diseño, en este caso 3,5 W/fase
- *Obtención de la curva de saturación o magnetización del estator:* el resultado de esta prueba es que el estator no entra en zona de saturación con ningún valor de corriente, por lo menos hasta más de dos veces la corriente nominal. Esto se debe en gran medida a la longitud del entrehierro, que es de 3 mm

### 3.2. Fabricación del vehículo

En esta etapa se consideraron las condiciones mecánicas a plena carga, las dimensiones de la pista y la ubicación que tendrían los imanes que conforman el campo que interactúa con el estator. El vehículo se desplaza y soporta sobre la pista por medio de cuatro rodachines; en la parte superior tiene una lámina de polietileno, sobre la cual se ubica el peso a transportar. Por cada lado del estator se ubicó una línea de imanes, cada una de ellas con 22 imanes de ferrita magnética de 600 gauss; ellos se ubicaron enfrentados con cada polo magnético del estator, en forma consecutiva y con polaridades contrarias, como se muestra en la Figura 9.



a)

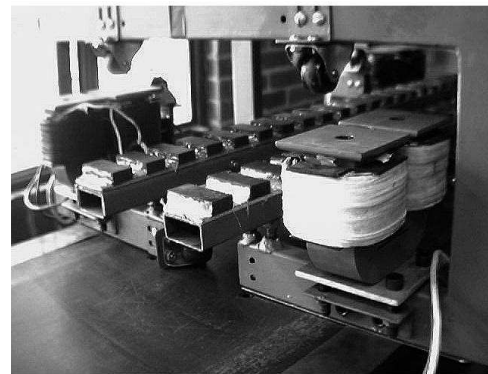


b)

**Figura 8.** Estator del motor sincrónico lineal. a) Núcleo ranurado, b) ubicación de los estatores en la estructura de sustentación.



a)



b)

**Figura 9.** Vehículo del motor. a) vista general, b) detalle de la ubicación de los imanes.

### 3.3. Capacidad de arrastre y resultados

La magnitud de la fuerza que produce el movimiento depende de la intensidad de los campos magnéticos en la máquina; así mismo, la capacidad de arrastre depende de la magnitud de esta fuerza. Realizando las pruebas correspondientes se pudo demostrar que el vehículo se puede cargar hasta con 80 kg: 30 kg son el peso de la estructura física del vehículo y los 50 kg restantes representan el peso que puede ser transportado sobre él.

Al término del proceso de construcción se hizo una recopilación con las características eléctricas y físicas del motor; los resultados se presentan en la Tabla 2. También se estableció

que se presentan a continuación se realizan para evaluar el trabajo del motor respecto a su propósito final, esto es, la medida en que el motor convierte la energía eléctrica de entrada en trabajo mecánico de salida. Para ello se realizará el cálculo de la eficiencia y se seleccionará el modelo eléctrico del motor.

### 4.1. Cálculo de la eficiencia

La eficiencia es el cociente entre la potencia mecánica de salida con respecto a la eléctrica de entrada; para determinarla deben realizarse experimentos en los cuales se mide cada uno de los parámetros expresados en las siguientes ecuaciones:

Característica	Valor	Característica	Valor
Dimensiones pista	(7*0,4*1,35) [m]	Tipo de conexión	Estrella (Y-Y)
Tipo de devanado	Imbricado, doble capa	Voltaje línea - línea	25 [V]
Calibre del alambre	Nº 16, Inom = 5 [A]	Corriente de línea	4 [A]
Espiras por bobina	13 Espiras	Potencia trifásica	0 - 90 [W]
Número de bobinas	582 por cada Lado	Resistencia por fase	3,5 [W]
Peso total de cobre	38 [kg]	Inductancia por fase	0,084 [H]
Distancia polar	36 [mm]	Dimensiones rotor	(0,65*0,53*0,23) [m]
Número de polos	194 por cada Lado	Tipo de imanes	Ferrita de 600 [gauss]
Fuerza máxima	1,63 [N]	Número de imanes	22 por cada Línea
Frecuencia	0 - 12 [Hz]	Peso del rotor	30 [kg]
Rampa aceleración	5 [s]	Carga adicional	50 [kg]
Rampa desaceleración	5 [s]	Velocidad nominal	0 - 0,87 [m/s]

Tabla 2. Características nominales del motor sincrónico lineal.

un diagrama de flujo que resume los pasos a seguir para el proceso constructivo de un MSL (ver Figura 10).

### 4. Determinación del modelo del motor

Las pruebas y mediciones antes enunciadas, practicadas a los devanados estáticos, al vehículo y al motor, tenían como fin verificar la integridad de los aspectos constructivos de la máquina. Las

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{elec}} \times 100\% \quad (7)$$

$$P_{mec}(t) = m \cdot \frac{dx(t)}{dt} \cdot \frac{d^2x(t)}{dt^2} \quad [w] \quad (8)$$

$$P_{elec} = \sqrt{3} \cdot v_1(t) \cdot i_1(t) \cdot \cos(\theta) \quad [w] \quad (9)$$



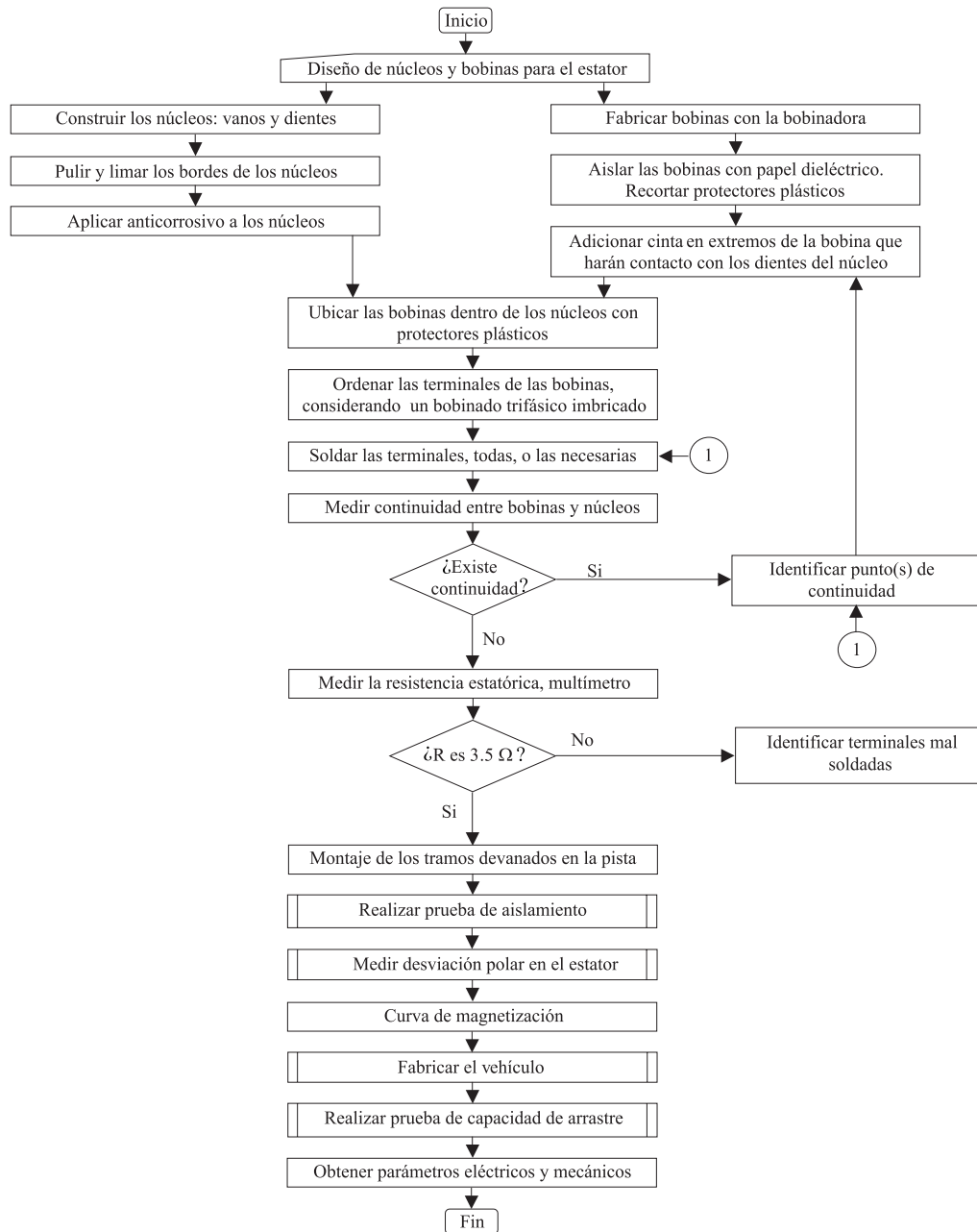


Figura 10. Diagrama de flujo del proceso de construcción del motor.

En las anteriores ecuaciones, “ $m$ ” es la masa del vehículo más la carga, “ $x(t)$ ” la posición del vehículo, “ $v_l(t)$ ” el voltaje de línea en el estator, “ $i_l(t)$ ” la corriente de línea y “ $\cos(\theta)$ ” el factor de potencia del estator. El voltaje de alimentación depende de la frecuencia de operación (ver sección 2 de este artículo); ocurre de igual forma

con la corriente, e inclusive con el factor de potencia. Luego de descubrir estas relaciones y medirlas utilizando el programa LabView, se obtienen curvas como las de la Figura 11; en todos los casos ellas se presentan en segundos.

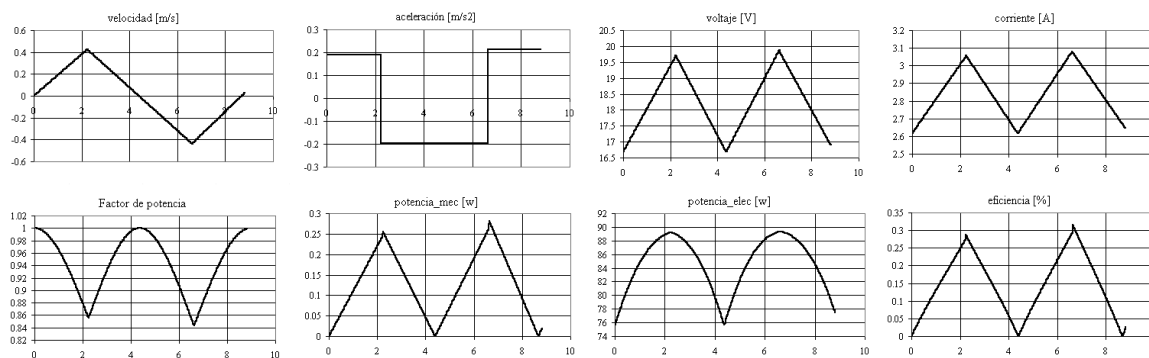


Figura 11. Variables mecánicas y eléctricas involucradas en el cálculo experimental de la eficiencia.

En la última gráfica de la Figura 11 se observa la señal de eficiencia durante el recorrido seleccionado como prueba, que fue de 1 m, resultando 0,3%. Este valor aparentemente muestra un motor de muy baja eficiencia; no obstante, puede mejorarse bajo condiciones nominales de trabajo, cuando el tamaño de la ventana de medición pase de un 1 m a la longitud total de la pista; en este caso se aumenta la frecuencia máxima de operación hasta que la eficiencia llega a un valor cercano al 3%, que aún es bajo con relación al desempeño acostumbrado en máquinas eléctricas.

La eficiencia puede aumentarse hasta valores usuales (60-80%) si se tiene en cuenta que la potencia eléctrica que consume el estator permanece constante luego de determinada frecuencia (Alvarado 2003: 46); por lo tanto el valor de la eficiencia puede mejorarse manipulando adecuadamente las variables mecánicas así:

- Incrementando la masa transportada, para lo cual se debe aumentar el número de imanes en la estructura del vehículo
- Incrementando la velocidad del vehículo en periodos de tiempo más cortos, es decir, aumentando la aceleración; este efecto por ahora no es permitido, debido a la capacidad del variador de velocidad con que se trabaja

- Aumentando la velocidad máxima: si la longitud de la pista fuese mucho mayor se incrementaría la velocidad máxima, y con ello la eficiencia.

#### 4.2 Modelo eléctrico

Para su determinación se realizaron tres pruebas: una de corriente continua, para conocer la resistencia del estator; las otras dos son la de circuito abierto y la de cortocircuito, para conocer el valor de la reactancia sincrónica. Con ellas se encuentra el circuito equivalente de la máquina por fase. Debido a que el devanado de campo está conformado por imanes, se realizó una representación equivalente a una corriente sin incluir ningún efecto resistivo. El circuito equivalente por fase del motor se muestra en la Figura 12 (Chapman, 2000: 352).

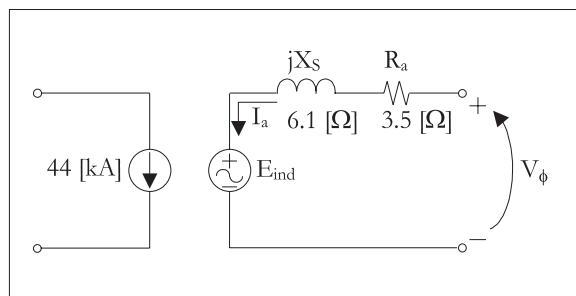


Figura 12. Modelo eléctrico del motor por fase.

Para realizar el diagrama fasorial se encontraron primero las variables que lo componen, identificadas mediante la siguiente ecuación 10, proveniente del modelo en la Figura 12:

$$E_{ind} = V_t - jX_s I_a - R_a I_a \quad (10)$$

En esta ecuación “ $E_{ind}$ ” es el voltaje inducido en el devanado estatórico, “ $v_t$ ” el voltaje entre terminales, “ $X_s$ ” la reactancia sincrónica, “ $I_a$ ” la corriente de armadura y “ $R_a$ ” la resistencia de armadura.

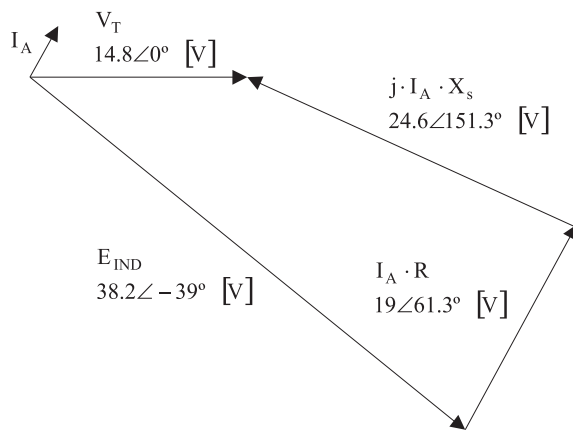


Figura 13. Diagrama Fasorial.

Para la determinación de la potencia de entrada se utilizó la Ecuación (9). La potencia convertida resulta de la diferencia entre la potencia de entrada y la que consume la resistencia del estator ( $R_a$ ). La potencia de salida se calculó mediante la ecuación (8).

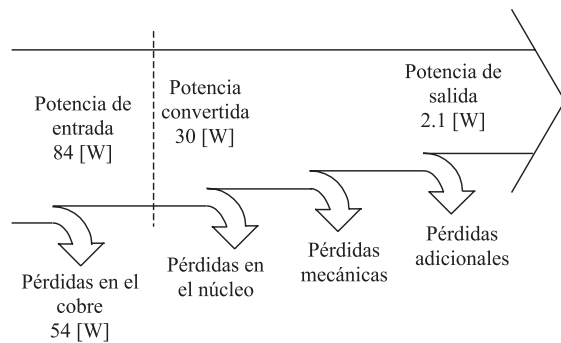


Figura 14. Flujo de potencia y pérdidas para la máquina.

## 5. Conclusiones y recomendaciones

Se ha comprobado que en el diseño de máquinas eléctricas es indispensable una mezcla adecuada entre la utilización de métodos empíricos y conceptos teóricos. Solo la interacción entre estos dos aspectos hizo que la experiencia en fabricación de máquinas del grupo de investigación se fusionara con el conocimiento acumulado en ecuaciones de electromagnetismo. Intercalar la fabricación de prototipos con el diseño de programas es una metodología correcta, haciendo que las experiencias de la fabricación del prototipo alimenten el programa de cálculo, y este último haga lo mismo con el dispositivo, hasta que se llegue al cumplimiento de parámetros iniciales de funcionamiento de la máquina, por ejemplo la velocidad nominal y la carga nominal, entre otros.

Si se quiere mejorar la eficiencia de la máquina desarrollada, que numéricamente es baja, deberán mejorarse uno o varios de los siguientes aspectos: a) incrementar la longitud de la pista de manera que la velocidad final pueda aumentarse, haciendo que se eleve el cociente entre la potencia mecánica de salida con respecto a la potencia eléctrica de entrada; b) incrementar el tamaño del vehículo para que se aproveche más energía de la que se está entregando a través del estator de la máquina y, c) construir un sistema que permita mayores rampas de aceleración, simultáneamente con mayores incrementos de corriente; de esta manera el sistema tendrá la fuerza necesaria para contrarrestar la inercia causada por un gran peso.

Aunque el uso del variador de velocidad dio buenos resultados, pueden hacerse desarrollos de dispositivos electrónicos que tengan una aplicación específica para la alimentación de motores sincrónicos lineales. Los variadores de velocidad comerciales disminuyen el voltaje de alimentación en relación con la frecuencia, para evitar la saturación que puede existir debido al cambio de la reactancia en la máquina.

Fue indispensable minimizar el espacio entre ranuras, debido a que los recorridos en los prototipos realizados son cortos; así la frecuencia del variador se traduce en velocidades bajas, y de esta manera, se tiene la posibilidad de aplicar aceleraciones bajas. Por ejemplo, el prototipo final contó con 194 polos que representan 38 kg de alambre número 16; este genera una velocidad máxima cercana a 1 m/s cuando la frecuencia de alimentación es aproximadamente 12 Hertz. La fuerza que generó fue suficiente para desplazar un vehículo de alrededor de 30 kg, más el peso a transportar, que fue de 50 kg.

El costo de implementación del sistema de propulsión en un sistema de transporte que haga uso alternativo de la energía eléctrica es el punto más crítico; por su incidencia, un proyecto de este tipo puede no ser atractivo económicamente. Una de las alternativas es el desarrollo de un motor

de inducción, el cual requiere de devanado únicamente dentro del vehículo. Este induce el voltaje y por tanto la corriente que se necesita para generar el movimiento; sin embargo, para esta alternativa es indispensable emplear material con buena conducción eléctrica, de tal manera que actúe como jaula de ardilla en el caso de los motores convencionales, elevando nuevamente el costo

La inclusión de técnicas como el diseño de elementos finitos de los circuitos magnéticos de las máquinas es indispensable. Aunque trabajar con valores de densidad de campo magnético constante, que conllevan la suposición de generación de fuerzas constantes, sea una buena aproximación, no es una estrategia suficiente para la optimización de una máquina, en la cual se deban trabajar los materiales hasta el límite diseñando sobre el codo de saturación para obtener los mejores resultados.




---

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- ALVARADO, J. y SALAMANCA, A. (2003). *Diseño y construcción del estator de una máquina sincrónica lineal*. Bogotá DC: Tesis de pregrado, Facultad Tecnológica, Universidad Distrital.
- CHAPMAN, S. (2000). *Máquinas eléctricas*. México: 3ª. ed. Mc Graw Hill.
- HAYT, W. (1991). *Teoría electromagnética*. México: 5ª. ed. Mc Graw Hill.
- KOSOW, I. (1995). *Máquinas eléctricas y transformadores*. México: 2ª. ed. Prentice Hall.
- NASAR, S. (1976). *Linear motion electric machines*. New York: John Wiley & Sons.
- RAIRÁN, D. (2003). *Levitación magnética, alternativa al transporte de pasajeros*. Bogotá DC: Editorial Universidad Distrital F.J.C.
- RAIRÁN, D. (1999a). *Levitación magnética, sistema alemán*. Bogotá DC: En: Mundo Eléctrico Colombiano N° 34, pp. 91-93.
- RAIRÁN, D. (1999b). *Levitación magnética, el sistema de transporte del futuro*. Bogotá DC: En: Tecnura N° 5, pp. 4-10.
- SINHA, P. (1987). *Dynamics y control, electromagnetic suspension*. Londres: Peter Peregrinus Ltda.