

APLICACION DEL MOTOR DE INDUCCION LINEAL COMO UNIDAD MOTRIZ EN UN TREN SUBTERRANEO DE DISEÑO CONVENCIONAL

Hernán Sanhueza Hardy*, y A.R. Straughen**.

RESUMEN - Este trabajo describe una investigación realizada para determinar una posible aplicación del motor de inducción lineal en trenes subterráneos de diseño convencional. El estudio se realiza en base a una configuración especial propuesta, que consiste en un cierto número de primarios colocados sobre la vía y entre los rieles; los primarios se van conectando a una red de frecuencia normal a medida que el tren avanza y son alcanzados por el secundario que va ubicado bajo los coches.

A partir de una curva fuerza-distancia y suponiendo un modelo ideal para el motor de inducción lineal, se establecen las ecuaciones necesarias para determinar la curva velocidad-distancia. Se desarrolla un método para determinar el consumo anticipado de energía. Se incluyen resultados numéricos de un ejemplo específico.

1. INTRODUCCION

Uno de los primeros sistemas de tracción empleando el motor de inducción lineal como unidad motriz, fue propuesto por Korda en Francia, en 1895¹.

Un sistema similar, denominado "Sistema de Tracción Tangencial" fue propuesto en Bélgica en 1905². El Profesor E.R. Laithwaite, en Inglaterra, revivió el interés en el motor de inducción lineal en un trabajo publicado en 1957³; a partir de entonces se ha realizado un considerable trabajo teórico y experimental, con el objeto de determinar las reales posibilidades de este tipo de motor eléctrico como unidad de tracción^{4,5,6,7}. Como resultado de estos estudios ha sido establecido que, el motor de inducción lineal es una alternativa promisoría para suministrar la potencia motriz requerida para impulsar trenes convencionales, y vehículos especiales propuestos para transporte de alta velocidad.

En este trabajo se propone impulsar un tren subterráneo de diseño convencional, mediante motores de inducción lineal, del tipo Primario Corto -Doble Lado, ilustrado en la Fig. 1. El sistema imaginado consiste en secciones de primario, distribuidas adecuadamente a lo largo de la vía; el secundario del motor va montado bajo los coches.

* Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Técnica del Estado, Santiago - Chile.

** Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Toronto, Toronto - Canadá.

Figura 1: Motor de inducción lineal tipo primario - corto - doble lado.

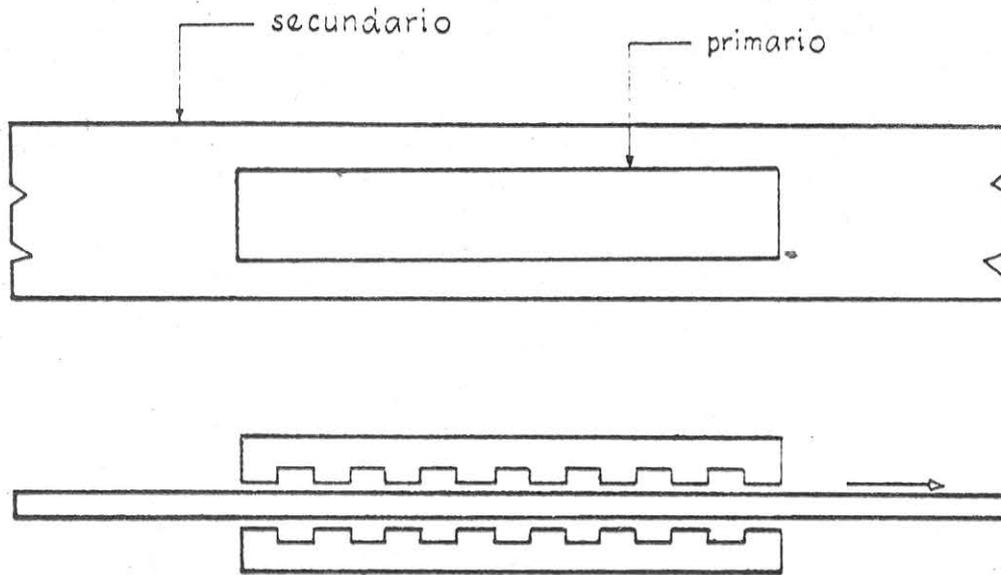
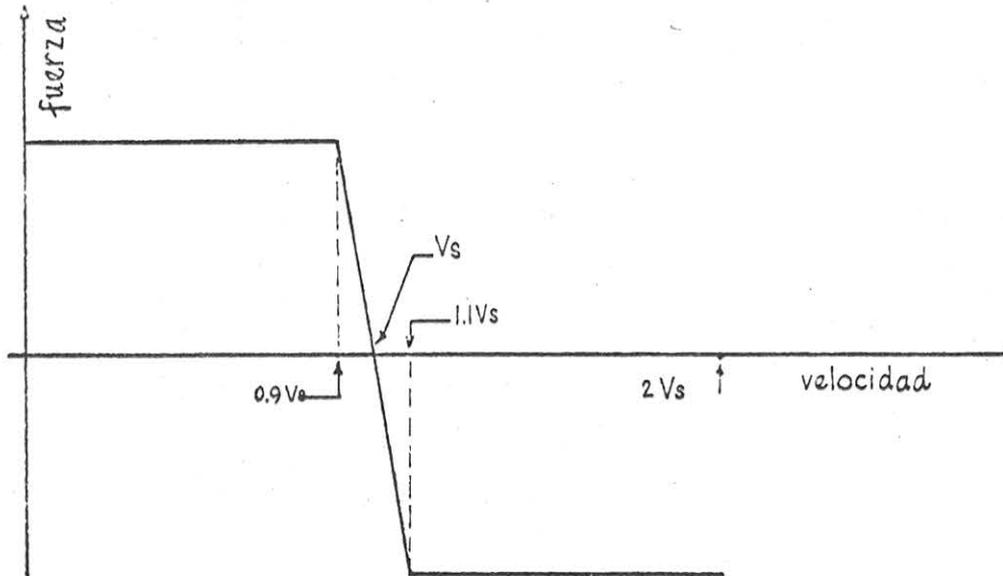


Figura 2: Característica idealizada fuerza - velocidad.



1.1 Suposiciones Básicas

Un motor de inducción lineal puede diseñarse de modo que tenga una característica fuerza-velocidad, similar a la de torque-velocidad de un motor de inducción tipo doble jaula de ardilla. Una aproximación lineal a esta característica, mostrada en la figura 2, será empleada en este estudio inicial de factibilidad.

Se ha establecido⁸ que el rendimiento máximo que se puede obtener en un motor de inducción lineal de primario corto y conexión serie y de n-polos, es del orden de $\frac{n}{n + 1,5}$ por lo tanto, se supondrá que el rendimiento, a un deslizamiento s, está dado por

$$\frac{n}{n + 1,5} (1 - s) \text{ ó bien } \frac{n}{n + 1,5} \frac{1}{1 + s}, \text{ según la máquina opere como motor}$$

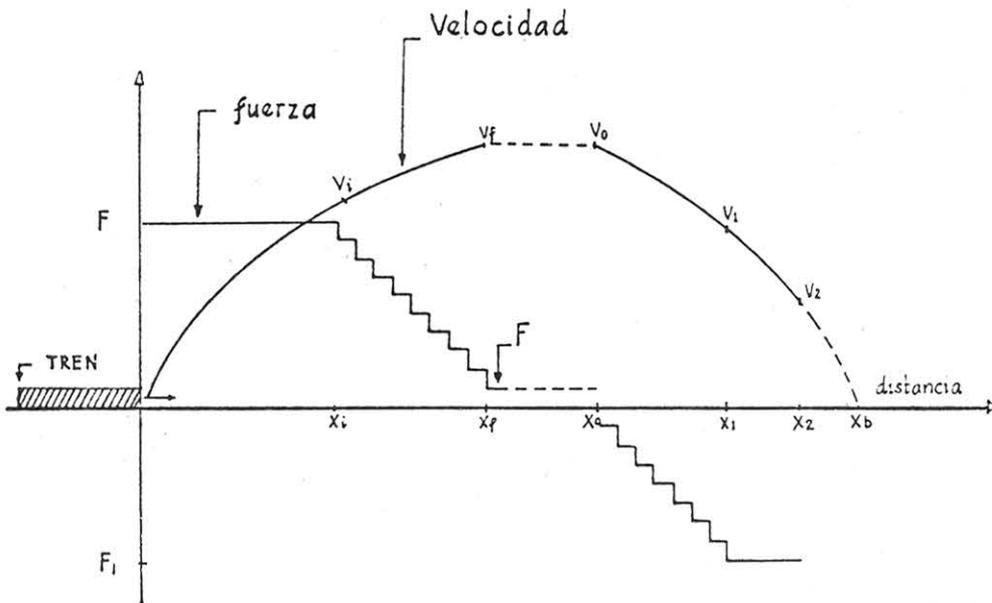
o generador respectivamente.

Por otra parte, se supondrá que es posible diseñar un sistema automático de control empleando técnicas de circuitos lógicos⁹, de tal modo que solamente sean energizados, los primarios que se van ubicando bajo los coches, para cualquier posición del tren a lo largo de la vía.

1.2. Descripción del Sistema Concebido

Los períodos de aceleración, velocidad constante y desaceleración se describirán con referencia a la figura 3.

Figura 3: Curvas fuerza - velocidad - distancia.



Aceleración

La fuerza de propulsión aplicada al tren permanece constante en un valor F_i hasta el punto x_i ; después de este punto el número de primarios bajo el tren decrece en pasos de una unidad; consecuentemente, la fuerza de propulsión corresponderá a una función escalera descendente, suponiendo que cada primario produce la misma fuerza de propulsión F_f . La fuerza máxima de propulsión F_i , se determinará teniendo presente la aceleración máxima aceptable que se ha supuesto igual a 3 millas/hora/seg. La razón F_i/F_f , determina el número total de primarios bajo el tren, durante el período de fuerza constante. Suponiendo una

distribución uniforme de primarios entre X_s y X_i , la distancia entre ellos queda determinada por la longitud del tren y el número correspondiente de primarios por longitud de tren. El punto X_i se determinará de tal modo que la velocidad de cruceo deseada V_f , se alcance cuando solamente un primario permanezca bajo el tren. El control de velocidad del tren se obtendrá por variación del paso polar p de los primarios, ya que la velocidad sincrónica V_s a una frecuencia f en un motor de inducción lineal, es igual a:

$$V_s = 2 p f \quad (1)$$

y la velocidad real a un deslizamiento s , está dada por:

$$V = (1 - s) V_s \quad (2)$$

Por lo tanto, será necesario diseñar primarios para una serie de velocidades sincrónicas y distribuirlos de acuerdo a estas velocidades sincrónicas.

Velocidad Constante

Se puede obtener una velocidad de cruceo prácticamente constante si la "sección primaria unitaria" se diseña de tal modo que su fuerza de propulsión F_f exceda levemente la resistencia del tren, a la velocidad de cruceo especificada.

Desaceleración

El tren será desacelerado en el intervalo $x_0 - x_2$, empleando frenado regenerativo. En este intervalo, se supone una distribución uniforme de primarios, de acuerdo a velocidades sincrónicas convenientes. En el punto x_0 , el número de primarios bajo el tren comienza a aumentar como una función escalera, hasta el punto X_1 . Después de este punto, el número de primarios y consecuentemente la fuerza de frenado, permanece constante hasta que se alcanza la velocidad mínima contemplada para regeneración, V_2 . La fuerza máxima de frenado F_1 queda limitada por la desaceleración máxima aceptable y por la fuerza de frenado adicional debida a la resistencia del tren al movimiento. Para detener completamente el tren, se podría emplear una combinación de frenado dinámico de corriente continua y un sistema de frenos de aire.

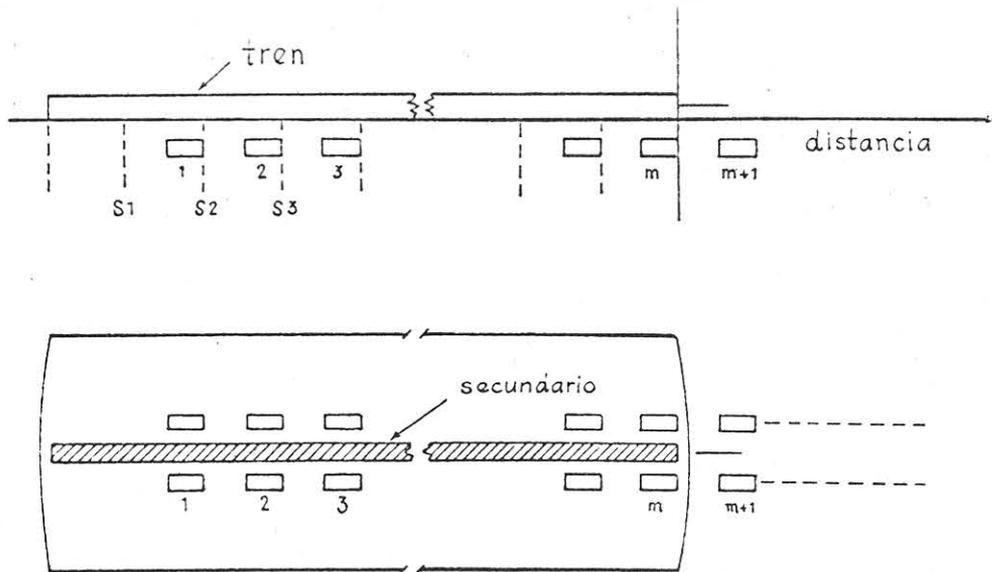
Equipo Auxiliar

El equipo eléctrico auxiliar transportado en los carros, incluyendo los compresores de aire para frenos, podrían alimentarse mediante un banco de baterías cargadas mediante generadores accionados por el mismo tren.

Operación Automática

La conexión y desconexión de un primario, requiere ser controlada automáticamente. Esto se explica en mejor forma refiriéndose a la figura 4, que corresponde a la posición de partida del tren. En un tiempo $t = 0$, los primarios 1 a m se conectan; cuando la parte trasera del tren alcanza el punto S_1 , el primario 1 se desconecta y al mismo tiempo se conecta al primario $m + 1$, y así sucesivamente. El frenado regenerativo debe entrar automáticamente en operación cuando el tren esté viajando a plena velocidad en gradiente descendente y durante el intervalo de frenado. De lo anterior, se desprende que un sistema como el descrito, necesitaría ser operado automáticamente. A juzgar por el "Transit Expressway" de la compañía Westinghouse¹⁰, el público está preparado para aceptar trenes operados automáticamente.

Figura 4: Conexión y desconexión de los primarios.



2. CONSUMO DE ENERGIA

2.1. Curva Velocidad- Distancia

Para calcular el consumo anticipado de energía del sistema descrito en la sección anterior, el primer paso consiste en determinar la curva velocidad-distancia.

Sean:

- V = velocidad
- a = aceleración
- x = distancia
- M = masa del tren
- R_t = resistencia del tren
- F_t = fuerza de propulsión del tren
- F_g = fuerza de frenado del tren debida a la regeneración

A_1, A_2, A_3 = coeficientes experimentales

A partir de la figura 3, se pueden establecer las siguientes ecuaciones, suponiendo que la función escalera se reemplaza por una función lineal.

Aceleración

La expresión general de la resistencia del tren¹¹ es:

$$R_T = A_1 + A_2V + A_3V^2 \quad (3)$$

$$\text{luego, } F_T = R_T + Ma \quad (4)$$

$$\text{o bien } F_T = A_1 + A_2V + A_3V^2 + MV \frac{dV}{dx} \quad (4.1)$$

A partir de la ecuación (4.1):

a) Intervalo $0 - X_i$

$$x = M \left\{ \frac{A_2}{2A_3 \sqrt{D}} \ln \left| \frac{(2A_3V + A_2 - \sqrt{D})(A_2 + \sqrt{D})}{(2A_3V + A_2 + \sqrt{D})(A_2 - \sqrt{D})} \right| - \frac{1}{2A_3} \ln \left| \frac{A_3V^2 + A_2V + A_1 - F_T}{A_1 - F_T} \right| \right\} \quad (5)$$

donde $D = A_2^2 - 4A_3(A_1 - F_T) > 0$

$$F_T = F_i$$

b) Intervalo $X_i - X_f$

$$\frac{dV}{dx} = \frac{1}{M} \left[\left(-\frac{F_i - F_f}{X_f - X_i} x + \frac{F_i X_f - F_f X_i}{X_f - X_i} \right) \frac{1}{V} - A_2 = A_3V \right] \quad (6)$$

Frenado

Puesto que no existen fuerzas externas actuando en la dirección del movimiento:

$$F_g + R_T + M_a = 0 \quad (7)$$

$$\text{de donde, } V \frac{dV}{dx} = -\frac{1}{M} (F_g + R_T) \quad (7.1)$$

A partir de la ecuación (7.1) se tiene:

a) Intervalo $X_0 - X_1$

$$\frac{dV}{dx} = -\frac{1}{M} \left\{ \left(\frac{F_1 - F_0}{X_1 - X_0} x + \frac{F_0 X_1 - F_1 X_0}{X_1 - X_0} \right) \frac{1}{V} + A_2 + A_3V \right\} \quad (8)$$

b) Intervalo $X_1 - X_2$

$$x = X_1 + \frac{A_2}{A_3 \sqrt{-D}} \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{2A_3V + A_2}{\sqrt{-D}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{2A_3V_1 + A_2}{\sqrt{-D}} \right) + \frac{1}{2A_3} \ln \left| \frac{A_3V_1^2 + A_2V_1 + A_1 + F_1}{A_3V^2 + A_2V + A_1 + F_1} \right| \right\} \quad (9)$$

donde $D = A_2^2 - 4 A_3(A_1 + F_1) < 0$

Empleando ecuaciones (5), (6), (8) y (9), y tomando en cuenta la aceleración y desaceleración máximas aceptables, la velocidad de cruceo, la velocidad mínima para regeneración y la distancia entre estaciones; se puede determinar la curva velocidad-distancia. A partir de esta curva, se puede determinar el número y distribución de primarios requeridos y sus respectivas velocidades sincrónicas.

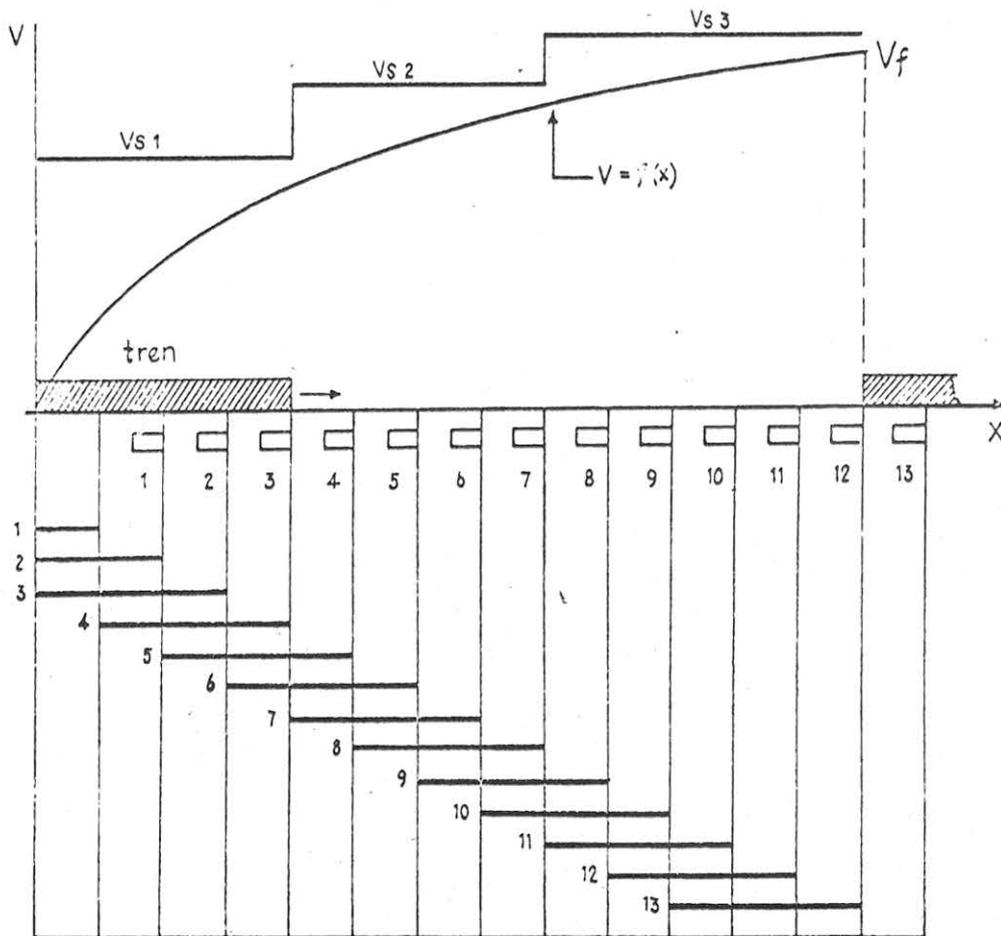
El rendimiento de cada primario, como una función de la posición del tren, se puede calcular a partir de las siguientes expresiones:

Para acción motor
$$\eta = \frac{n}{n + 1.5} (1 - s) \frac{n}{n + 1.5} \frac{V}{V_s} = k_1 f_1(x) \quad (10)$$

Para acción generador
$$\eta = \frac{n}{n + 1.5} \frac{1}{1 + s} = \frac{n}{n + 1.5} \frac{V_s}{V} = k_2 f_2(x) \quad (11)$$

Combinando información dada por la curva velocidad-distancia, con el modo de conectar y desconectar los primarios, se puede determinar los "intervalos de trabajo" de cada primario; esto se ilustra en la figura 5. En el ejemplo aquí presentado, se supone que se requiere

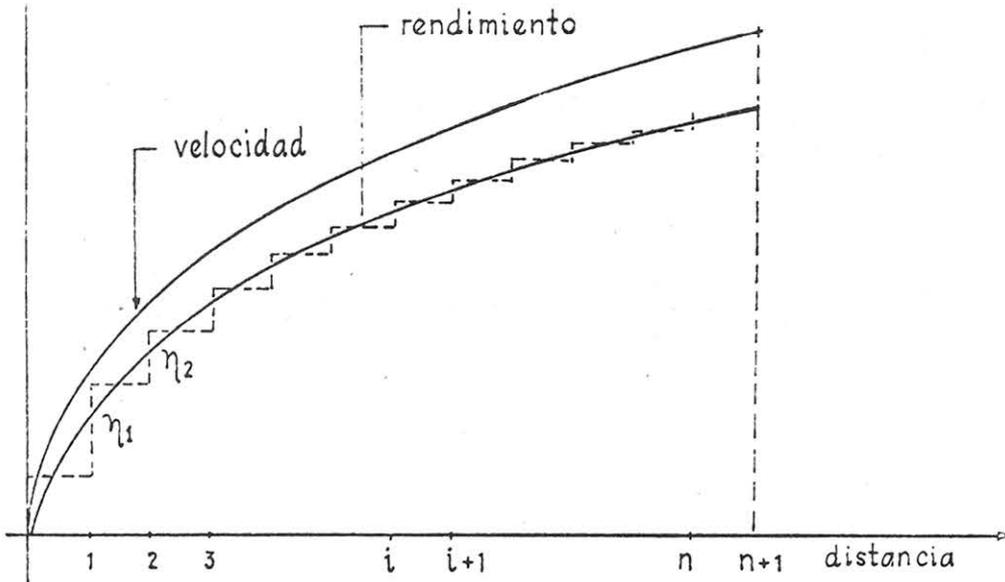
Figura 5: Intervalo de trabajo de los primarios.



ren 13 primarios durante el período de aceleración y que ellos están distribuidos de tal modo que los primarios 1 a 4 tienen una velocidad sincrónica V_{s1} , los primarios 5 a 9 tienen una velocidad sincrónica V_{s2} y los primarios 10 a 13 una velocidad sincrónica V_{s3} . El intervalo de trabajo del primario 1 se señala mediante una línea gruesa y así sucesivamente.

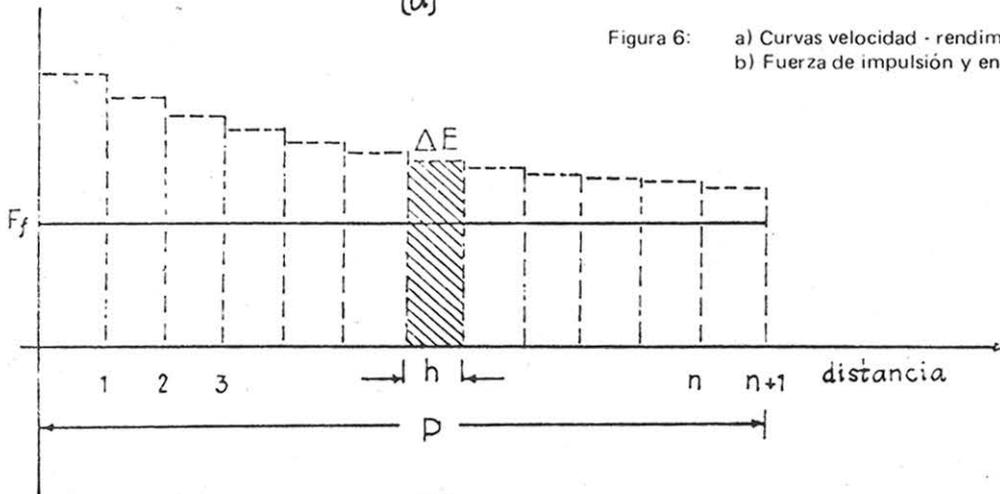
2.2. Energía suministrada durante la aceleración

Si la distancia de aceleración se considera dividida en intervalos iguales de magnitud P (igual a la distancia entre primarios consecutivos), entonces a partir de la figura 6, se puede calcular



(a)

Figura 6: a) Curvas velocidad - rendimiento - distancia. b) Fuerza de impulsión y energía suministrada.



(b)

la energía suministrada a un primario cualquiera, durante un intervalo P , como sigue:

20 Energía durante un intervalo $h = \Delta E \approx 2F_f h \frac{1}{\eta_i + \eta_{i+1}}$

Energía durante un intervalo $P = E_p \approx 2F_f h \sum_{i=0}^n \frac{1}{\eta_i + \eta_{i+1}}$

Donde F_f , representa la fuerza útil de propulsión de un primario.

Extendiendo este procedimiento a todo el intervalo de trabajo del primario, es posible determinar su energía total suministrada. El procedimiento general para calcular la energía suministrada total, como una función de la posición del tren, se muestra en el diagrama de flujo simplificado de la figura 7.

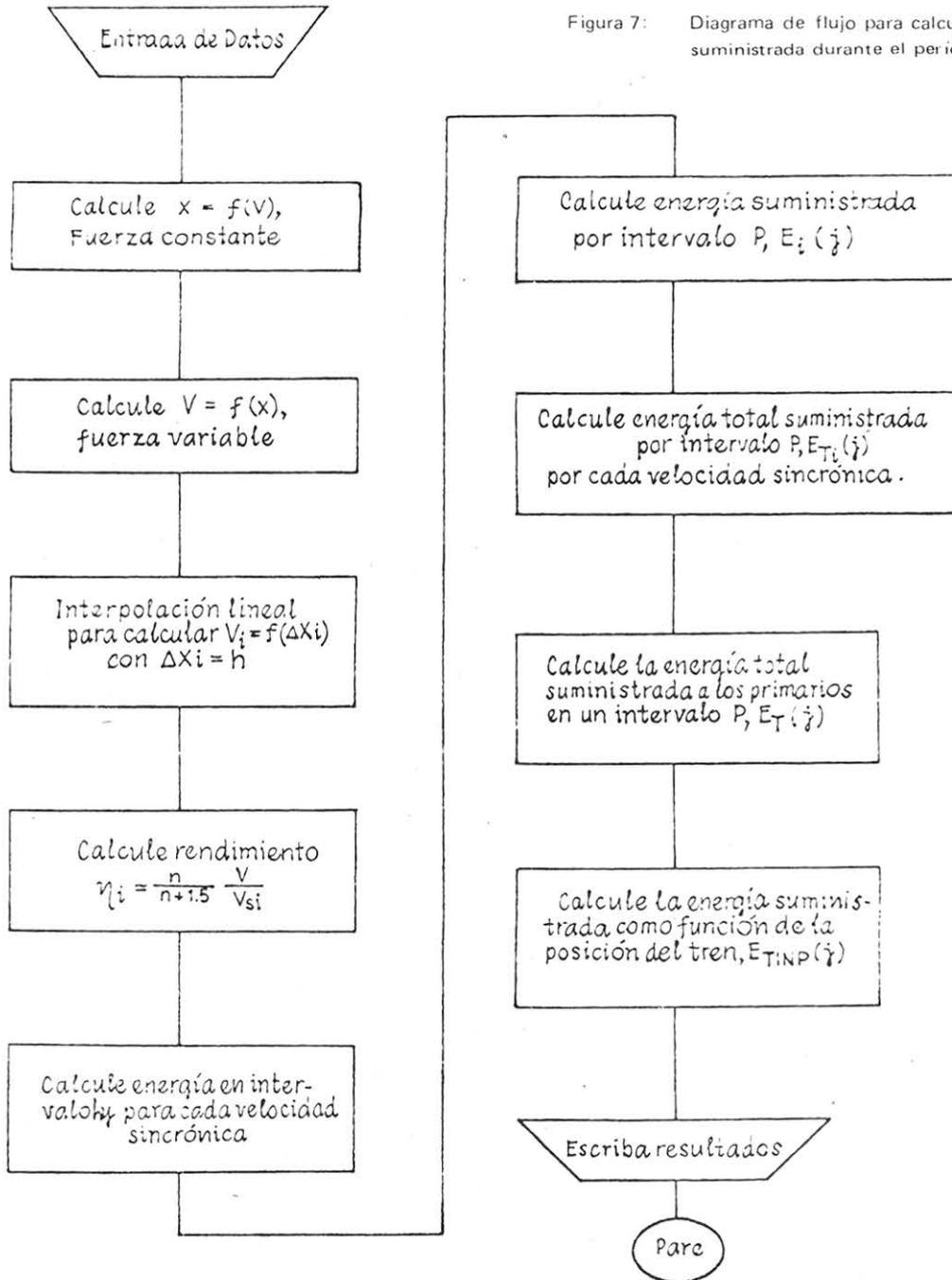


Figura 7: Diagrama de flujo para calcular la energía suministrada durante el periodo de aceleración.

Donde:

- $E_i(j)$ — energía suministrada durante un intervalo j de magnitud P , correspondiente a un primario de velocidad sincrónica V_{si} .
- $E_{Ti}(j)$ — energía total suministrada durante un intervalo j , correspondiente a un grupo de primarios de igual velocidad sincrónica V_{si} .
- $E_T(j)$ — energía total suministrada a los primarios durante un intervalo j .
- $E_{TINP}(j)$ — energía total suministrada a los primarios después de j intervalos.

2.3. Energía recuperada durante el Período de Frenado

Es posible emplear un procedimiento completamente similar al descrito anteriormente, para calcular la energía recuperada durante el período de frenado del tren.

3. EJEMPLO NUMERICO

Siguiendo las ideas establecidas previamente, se desarrolló un ejemplo numérico. Para este efecto, se consideró un tren subterráneo de diseño convencional formado por ocho carros en una vía horizontal.

Características de los carros:

Número de ejes	=	4
Peso total, en vacío	=	83470 libras
Peso total, en carga	=	92150 libras
longitud	=	55,6 pies
Perímetro del area transversal	=	40,0 pies

La aceleración y desaceleración máximas aceptables fue supuesta igual a 3,0 millas/hora/segundo, y la velocidad de cruceo igual a 55,0 millas/hora. La distancia entre estaciones fue considerada igual a 2.200 pies, correspondiente a la distancia promedio entre estaciones de una línea del sistema de tren subterráneo de Toronto - Canadá. Para evaluar la resistencia del tren, se empleó la fórmula de Davis modificada por Totten¹¹. A partir de un cálculo preliminar empleando las ecuaciones (4) y (7), se adoptaron los siguientes valores:

- Fuerza constante durante los períodos de aceleración y desaceleración, $F_i = F_1 = 90.000$ libras.
- Fuerza útil de propulsión de cada primario = 3.000 libras.
- Dimensiones aproximadas de un primario: longitud = 6 pies, altura = 6 pulgadas.

Siguiendo una recomendación hecha en un simposium¹², respecto al número adecuado de polos de un motor lineal para uso en tracción, se computaron los valores indicados en la Tabla 1, suponiendo una frecuencia constante de 60 c/s y la característica mostrada en la Fig. 2. En la Tabla 1; n es el número de polos de los primarios, p es el correspondiente paso polar; V_s es la velocidad sincrónica; $0,9 V_s$ y $1,1 V_s$ son las velocidades límites correspondientes a la máxima acción como motor y generador respectivamente, de los primarios. Puede observarse que la velocidad mínima considerada para una regeneración efectiva es 33,7 millas/hora.

Empleando las ecuaciones deducidas en la sección anterior, se computó la velocidad como una función de la distancia. Algunos valores calculados, correspondientes a la figura 3, se indican en la tabla 2. Las distancias correspondientes a los períodos de frenado, se compu-

taron considerando $X_0 = 0$; en particular, se supuso una desaceleración constante en el intervalo $X_2 - X_b$.

La Tabla 3 muestra la distribución de los primarios de acuerdo a sus velocidades sincrónicas, y además, el número total de primarios requeridos durante los períodos de aceleración y frenado.

Se desarrolló un programa de computación, siguiendo las etapas del diagrama de flujo

TABLA 1

n	p (in.)	V_s (mph)	$0.9V_s$ (mph)	$1.1 V_s$ (mph)
8	9	61.4	55.3	67.5
10	7.2	49.1	44.2	54.0
12	6.0	40.9	36.8	44.9
14	5.1	35.1	31.6	38.6
16	4.5	30.7	27.6	33.7

TABLA 2

	ACELERACION					FRENADO				
	V_i (mph)	X_i (ft)	V_f (mph)	X_f (ft)	V_0 (mph)	V_1 (mph)	X_1 (ft)	V_2 (mph)	X_2 (ft)	X_b (ft)
TREN VACIO	47.0	559.0	55.0	975.0	55.0	46.0	416.0	33.7	655.0	932.0
TREN EN CARGA	44.7	559.0	52.4	975.0	52.4	43.8	416.0	33.7	625.0	903.0

NOTA: Distancia entre estaciones = $X_f + X_b +$ distancia a velocidad constante.

TABLA 3

VELOCIDADES SINCRONICAS (mph)	ACELERACION					FRENADO	
	30.7	35.1	40.9	49.1	61.4	35.1	30.7
NUMERO DE PRIMARIOS	13	4	6	11	34	7	39
NUMERO TOTAL DE PRIMARIOS	68					46	

mostrado en la figura 7, para calcular la energía suministrada y recuperada durante los períodos de aceleración y frenado respectivamente. Los resultados se indican en la Tabla 4.

TABLA 4

	ENERGIA SUMINISTRADA (KWH)	ENERGIA RECUPERADA (KWH)
TREN VACIO	57.7	9.60
TREN EN CARGA	60.7	9.30

A partir de los cálculos anteriores y suponiendo una distancia entre estaciones igual a 2.200 pies, se determinaron las siguientes cantidades de consumo de energía:

Tren de vacío — 0,348 KWH/Tonelada — milla

Tren Cargado — 0,338 KWH/Tonelada — milla

Si la distancia entre estaciones se considera igual a 0,89 millas e igual a la distancia promedio cubierta en un viaje por el sistema experimental Westinghouse¹⁰, resultan los siguientes valores para el consumo de energía:

Tren Vacío — 0,176 KWH/Tonelada — milla

Tren Cargado — 0,170 KWH/Tonelada — milla

El consumo de energía del sistema experimental Westinghouse, cargado, es 0,163 KWH/Tonelada-milla.

Los valores reales de consumo de energía serán más elevados que los calculados, principalmente debido a el efecto de las curvas y al rendimiento efectivo del sistema.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo muestra que el consumo de energía en un sistema como el propuesto, es comparable al de un sistema empleando unidades de tracción convencionales.

Algunas ventajas potenciales de este sistema en relación a los convencionales, son:

- Eliminación de los rieles colectores de corriente eléctrica.
- Los límites de aceleración y desaceleración, no dependen de la adherencia rueda-riel.
- Eliminación de equipo eléctrico y mecánico de gran potencia, del vehículo.
- Empleo de frenado regenerativo durante la desaceleración.

El método de cálculo presentado para evaluar el consumo anticipado de energía y los resultados obtenidos, pueden ser útiles como puntos de partida para futuros trabajos.

Es evidente que la factibilidad real de un sistema como el descrito, sólo puede establecerse después de un detallado estudio de muchos factores técnicos y económicos no considerados en este estudio básico.

BIBLIOGRAFIA

1. F.D. "Traction électrique indépendante de l'adhérence", *Le Génie Civil*, avril 1901, pp. 381 - 382.
2. WILSON, H.W., "Electrification of Railways", Liverpool Engineering Society, 31th session, march 1905, pp. 218 - 220.
3. LAITHWAITE, E.R., "Linear Induction Motor", IEE Paper N° 24330, december 1957, pp. 461 - 470.
4. LAITHWAITE, E.R., "Induction Machines for Special Purposes", G. Newnes Ltd., 1966.
5. PELENC, Y. "Nouvelle Méthode de Propulsion Electrique", *Revue Générale de l'Electricité*.
6. U.S. Department of Transportation, "Study of Linear Induction Motor and its Feasibility for High-Speed Ground Transportation", Report N° 67 - 1948, june 1967.
7. ARMSTRONG, D.S., "Application of the Linear Induction Motor to Transport", *The Railway Gazette*, february 1967.
8. BARWELL, F.T. and LAITHWAITE, E.R., "Application of the Linear Induction Motor to High - Speed Transport", IME Paper 6, october 1966, p. 10.
9. M.I.T., "The Glideway System", Report N° 8, 1965, p. 221 - 223.
10. Transit Expressway Report, MPC Corporation, february 1967.
11. HAY, W.W., "Railroad Engineering", J. Wiley, 1953.
12. CHIRGWIN, K.M., "Linear Induction Motor Research in USA", High - speed Symposium, Vienna 1968.