

Tracción y levitación magnéticas

Julio Pinto Silva, Ingeniero.

Técnica Industrial, n.º 205

El proyecto del que se da cuenta en el presente artículo ha sido galardonado con el Premio Lillehammer 1995. Este premio se concedió en la reunión que la Conferencia Ministerial EUREKA celebró en Interlaken (Suiza) y supone el máximo reconocimiento europeo a un proyecto técnico innovador y respetuoso con el medio ambiente.

1. Disgresión histórica

Después de 30 años de investigación aplicada y de una inversión a nivel mundial que estimamos en 3.000 millones de \$USA, asistimos al alba de un nuevo modo de transporte terrestre, que yo denomino **monovía** o **vía de monovigas**, que algunos autores americanos llamaron *magneplane* o *magway* y que el resto de autores llaman *magnetical levitation*, que compartiendo, más o menos, las directrices que más adelante se dirán, difieren entre sí en detalles de tracción o de sustentación.

Como en todo amanecer, el halo solar no llega a iluminarlo todo y, bajo la línea del horizonte, en muchos lugares existen brumas, zonas intermedias y puntos negros correspondientes a vórtices de intereses espúreos de políticos nacionales, y de grandes multinacionales que falsean la realidad, disimulando carencias y magnificando resultados, y en ciertos países donde la política de la tecnología oficial es cambiante y frívola en demasiadas ocasiones, los políticos son engañados con facilidad por los agentes de las quintas columnas extranjeras, que desde Viroto nunca faltaron en España.

Me propongo examinar muy rápidamente, a grandes rasgos, las principales características de este nuevo transporte, que atraviesa ahora la misma fase previa a su comercialización universal por la que pasó hace un siglo el automóvil y dos décadas después el avión.

Vaya como muestra que acabo de pasar varias semanas en México, discutiendo con un numeroso grupo de ilustres ingenieros, directores generales y secretarios del DDF la implantación del Monoviga para una línea de 20 km, frente a soluciones japonesa, alemana y francesa, de las que las dos primeras son ya soluciones de levitación magnética, en contraste con la tercera, que es una solución convencional. La solución española admite la modalidad semi-magnética, es decir con sustentación por ruedas y tracción lineal. Debidamente completada podrá actuar también como levitador de repulsión según la técnica del «río magnético» de Laithwaite.

La evolución de la idea fuerza de los motores lineales y de los levitadores magnéticos está contenida en una selección de 1.300 a 1.400 artículos técnicos y patentes, hecha por mi socio y amigo profesor Eric Laithwaite, de los cuales él ha escrito un centenar,

además de cinco libros. Una tercera parte de estos artículos están dedicados al transporte monoviario.

Debe señalarse que existen 18 modos diferentes de sustentación magnética y 5 tipos distintos de tracción lineal.

A título de curiosidad puede indicarse también que las evoluciones de los motores térmicos y de los motores eléctricos ha sido inversa, por cuanto aquellos pasaron del movimiento lineal alternativo al circular de Wankel, a la turbina, y éstos han pasado del circular al lineal.

Durante los 30 años del período de investigación y desarrollo, trabajaron en el tema de los vehículos no convencionales 30 empresas de España, Gran Bretaña, Francia, Italia, Alemania, USA, Canadá y Japón, ensayando 30 prototipos de otros tantos inventores, fuertemente apoyados por los respectivos gobiernos de sus países, con una media de 10 millones \$USA por cada uno.

De todas estas empresas, sistemas e inventores, el paso de la frontera entre la teoría y la práctica dejó en el intento 25 empresas y sistemas. Sólo 5 subsisten, entre ellas la mía, a pesar de ser la que menor ayuda recibió del Gobierno (sólo 5 millones de \$USA). Somos también los que mejores resultados técnicos hemos conseguido, de tal forma que, si no fuese por la apatía oficial, hoy habríamos ya exportado bienes y servicios por valor de 1.000 millones de \$USA.

2. Por delante de todos los otros

En **Eurotrén Monoviga, S. A.**, hemos conseguido construir, experimentar y homologar el sistema más avanzado del mundo para resolver el viejo problema del transporte colectivo, con los costos más bajos, tomando la posición de cabeza mundial con su versión *EM403*, de concepción metamérica, diafanidad interior continua, ruedas neumáticas independientes autovirables y motores eléctricos rotativos asíncronos, de inducción en jaula de ardilla.

Además de ello, hemos desarrollado como empresa líder el proyecto *Eureka EU277*, en estrecha colaboración con el profesor Laithwaite, del Imperial College de Londres, y con el profesor Alonso, catedrático de Máquinas Eléctricas de la Escuela Superior de Ingenieros Industriales de Madrid, dentro del acuerdo suscrito entre *EMSA* y la Universidad Politécnica de Madrid.

El *EU 277* es un motor trifásico asíncrono, lineal, de campo transversal y dotado de compensación automática del entrehierro, que supera cuanto se ha hecho en 20 años de evolución de los motores lineales en relación peso/potencia, rendimiento y factor de potencia. Obviamente, es un motor de estator corto.

Como es bien sabido, el transporte guiado convencional, el **ferrocarril**, tuvo su período de esplendor entre los años 1860 y 1914. A partir de entonces se inició su decadencia, debido a la competencia del automóvil. A esto se sumó, después de 1950, la competencia del avión.

Entre 1950 y 1970, una serie de nuevos modos intermedios surgen con la pretensión de suplir al ferrocarril en servicios urbanos e interurbanos, sin éxito, desde los monorrieles *atweg* y *safège* a la *strada guidatta* de Maestrelli (y sus copias) y al *binario* elevado de Goicochea y algún mini-metro o *people mover*.

Ninguno de ellos alcanzó resultados importantes, pero abrieron el camino a una nueva concepción de transporte guiado de alta velocidad: **la monovía**.

El nuevo concepto adopta las siguientes directrices:

1. Infraestructura rígida, desechando la vieja viga flotante ferroviaria constituida por una capa de balasto directamente asentada sobre la explanación.
2. Diseminación total de las sobrecargas, de forma que la sobrecarga móvil por metro lineal sea, todo lo más, igual al peso propio de la infraestructura.
3. Taras muy ligeras y cargas puntuales reducidas, por abandono de las cargas concentradas.
4. Infraestructura elevada, de gran esbeltez, para disminuir la ocupación de terrenos y evitar los efectos cortina y cicatriz.
5. Disminución del ruido y la contaminación ambientales.
6. Disminución de los costes de inversión.
7. Disminución de los costes de explotación.
8. Alta velocidad y alta aceleración.
9. Indescarrilabilidad absoluta.

Estas directrices, que no eran compatibles con los viejos ferrocarriles ni con las autopistas, se materializaron en 4 sistemas: uno español (**Fig. 1**), dos alemanes y uno japonés, de los que nos ocupamos inmediatamente, después de un breve recordatorio.

Recordemos que los vehículos están formados por:

1. Una caja portadora de la carga útil o de pago.
2. Un órgano de sustentación.
3. Un órgano de propulsión.
4. Un órgano de guiado.

Recordemos también que, desde el punto de vista de la interacción vehículo-vía, es indiferente el tipo de órgano utilizado. Lo que cuenta son los esfuerzos estáticos y dinámicos que el vehículo ejerce sobre la vía, así como la existencia o no de deslizamiento entre el órgano propulsor y la vía. Ambos esfuerzos son consecuencia de la sollicitación unitaria propulsor-vía.



Fig. 1. Versiones artísticas Eurotrenes tipo EM 500 y EM 700 de motor lineal.

En los años 60, los esfuerzos de algunos ingenieros fueron dirigidos a utilizar colchones de aire y, en los 70-80, campos magnéticos, como modo de distribución de las cargas de los vehículos, sobre grandes superficies, para conseguir bajas presiones sobre la vía.

Pero igual resultado puede obtenerse conservando las ruedas –neumáticas o metálicas, según las velocidades sean mayores o menores de 200 km/h– en número suficiente y disposición adecuada, para que sus cargas, verticales y laterales, sean suficientemente bajas.

Sistemas de competencia

En la **Tabla I** se indica un resumen de las características principales de tres de los sistemas que lograron imponerse.

3. El eslabón intermedio

Hacia 1960 se ponía en duda el papel preponderante de la rueda que, con su triple misión de mecanismo portante, propulsor y director, había protagonizado el desarrollo ferroviario y automovilístico. En 1955, con el fracaso ferroviario francés de las Landes, los ingenieros creyeron que la rueda sólo podía funcionar aceptablemente en el tope de los 200 km/h.

En 1961, Gregory Bekker publica «*Is the wheel the last thing in land transportation?*». Ya por entonces, el ingeniero Scholz, de Fiat,

había iniciado la creación de un vehículo sobre colchón de aire y, de otra parte, Cockerell había inventado el Hovercraft. Los americanos dieron gran impulso a la construcción de vehículos terrestres de colchón de aire para sus guerras coloniales y los canadienses lo hicieron también para poder cruzar sus grandes extensiones nevadas.

Entre 1960 y 1970 se ponen en marcha el *Terraplano*, el *Aerotrén* de Bertin y el *Hovertrain* de Cambridge. Los dos últimos son vehículos sustentados por colchón de aire y propulsados por motor lineal. Al otro lado del Atlántico, les acompaña la experimentación de tres vehículos guiados, uno sobre ruedas de acero/raíl y dos sobre colchón de aire, propulsados por motor lineal. Fueron:

1. El **LIMRV** (vehículo ferroviario de motor lineal de inducción), montado sobre ruedas de acero, realizado por la firma *Garret Corporation*, que alcanzó 150 km/h; su motor era de dos caras. Posteriormente, y con la ayuda de dos reactores a chorro, alcanzó 411 km/h, en el año 1974.
2. El **TLRV** (vehículo levitado) sobre colchón de aire, de la *Grumman*, con motor lineal de inducción de doble cara, con un entrehierro total de 38×2 mm, alcanzando 480 km/h, $\eta = 0,8$ y $\cos \varphi = 0,575$. El reactor vertical tenía una altura de 300 mm.
3. El **PTACV** (prototipo de vehículo guiado de colchón de aire), construido por la *Rhor Corporation*. Provisto de un motor lineal de doble cara vertical, con una velocidad máxima de 225 km/h. Su motor parece que tenía un $\cos \varphi = 0,03$.

La muerte de Bertin, en 1974, acabó con los trabajos del *Aerotrain*, cuyo prototipo tuvo ocasión de fotografiar en 1989, en Orleans, en un deplorable estado de abandono y víctima de un vandalismo «tercermundista».

Todos ellos fracasaron debido al alto coste energético de la sustentación neumática, por un lado, y a los bajos rendimientos y factor de potencia de los motores lineales, de simple o doble cara, pero de flujo longitudinal, por otro lado.

Los fracasos de los vehículos sustentados por colchón de aire sirvieron para poner de manifiesto que la rueda ya no era el único mecanismo de locomoción posible y, al mismo tiempo, que se podían alcanzar altas velocidades con los vehículos guiados.

Mientras tanto, el trabajo de investigación se dirigió, tras los fracasos del colchón de aire en las rutas guiadas, hacia la levitación magnética, término éste equívoco e incorrecto, puesto que levitar es escapar, por méritos metafísicos, a la ley de la gravitación. Sólo puede existir una pseudo-levitación en un punto del espacio, donde las gravitaciones de dos o más astros se compensen. Es el caso de la «ingravidez» de los astronautas al situarse a cierta distancia entre la Tierra y la Luna, que desde luego no es levitación sino una doble gravitación de resultante cero. En realidad, el único vehículo *maglev* fue el carro de Elías, 860 años antes de Cristo.

Los vehículos de colchón de aire eran poco eficientes. Su sustentación consumía mucha energía y la propulsión por motores lineales de flujo longitudinal, de simple cara horizontal o de doble cara vertical, presentaba bajos rendimientos y factores de potencia inferiores a 0,3. Además, estos últimos, empleados por Bertin y la Garret, suponían serios peligros derivados de la posibilidad de contacto, por alabeo, del reactor del aluminio central con cualquiera de los primarios.

Por ello, los desarrollos sucesivos se dirigieron en cuanto a la propulsión a la utilización de motores horizontales de una sola cara de estator largo, lo que supone situar el primario en la vía y el secundario a bordo, en los de estator largo.

Para la sustentación se eligió la atracción magnética mediante electromagnetos dispuestos en aletas que colgaban del vehículo por debajo de la vía. Esta disposición se debió al ingeniero German Kemper, alemán, cuyas primeras patentes datan de 1934.

Anteriormente, entre 1912 y 1914, ya Bachelet había realizado intentos para crear la sustentación y tracción magnética, mientras el alemán Zender había patentado la tracción por motor lineal.

También en torno al año 1970, se iniciaron intentos para obtener la sustentación y tracción electrodinámica, por efecto de las interacciones entre bobinas eléctricas, recorridas por altas intensidades, que generan campos magnéticos de varios teslas. Las altas intensidades requieren bajas resistividades, lo que obliga a la superconducción criogénica, instalando a bordo unidades con temperaturas de pocos grados Kelvin. La investigación continúa en USA y Japón. Es este último a cargo de los ferroviarios.

TABLA I

Nombre	País	Tipo	Velocidad (km/h)	Sustentación	Propulsión	Guiado
Eurotrén Monoviga	España	EM 500-1	200	Ruedas neumáticas	Motor estator corto Inducción Flujo transversal	Ruedas neumáticas
Eurotrén Monoviga	España	EM 500-2	300	Ruedas de acero sin pestañas	Motor estator corto Inducción Flujo transversal	Ruedas de acero sin pestaña
Eurotrén Monoviga	España	EM 500-3	300	Río magnético (repulsión)	Motor estator corto Inducción Flujo transversal	Río magnético
Transrápid	Alemania	007	400	Electromagnética (atracción)	Motor síncrono estator largo	Electromagnético
HSST	Japón	100	100	Electromagnética (atracción)	Motor estator corto Flujo longitudinal	Electromagnético

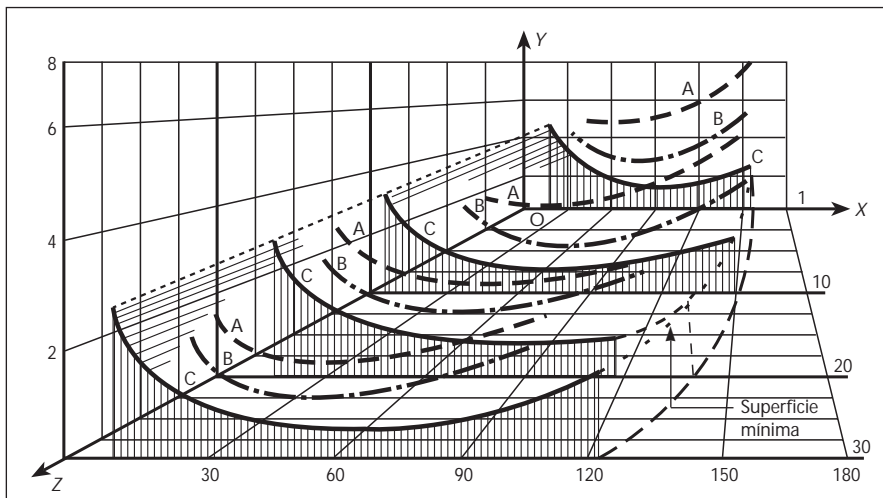


Fig. 2. Triedro del coste de transporte.

4. Proyecto Eureka EU 277

Yo había iniciado, en 1970, el establecimiento de una doctrina de transporte, según los nueve criterios indicados al principio.

Había seguido de cerca los trabajos de Laithwaite y de Pouloujadoff en las motorizaciones por motor lineal del *Hovertrain* y del *Aerotrain*, respectivamente. En Cambridge examiné el *Hovertrain* y en Grenoble la gran rueda de Pouloujadoff. En 1971, Laithwaite y yo estudiábamos la aplicación del motor lineal al monoviga, con vistas a su aplicación al ferrocarril de Nuria.

A principios de los 70 se empezó a trabajar en el diseño de una red europea de alta velocidad, que se llamo *Eurospeed*. Se formó el *Subcomité de Alta Velocidad de Cembureau*, en Zurich, del que formé parte y que fue el primer foro interdisciplinar que analizó de manera integral tanto los temas de la vía como los diferentes tipos de vehículos.

Establecí entonces el diagrama del triedro del coste del transporte, con el que se podía comparar los costes de la dualidad vehículo-vía, y que fue tema presentado al Congreso de Delf, de 1975, por Schmit. Este triedro era el medio adecuado para estudiar el comportamiento conjunto vehículo-vía, dualidad inseparable que hasta entonces sólo se había analizado por separado. Con ello sustituí el diagrama de Gabriell-Von Karman que daba el coste de la velocidad máxima de los vehículos, pero sólo desde el punto de vista del Ingeniero Mecánico (Fig. 2).

En los primeros 70, la situación de la tracción lineal era muy confusa y otro tanto sucedía con la sustentación magnética.

Los motores lineales de estator corto y de flujo longitudinal habían dado en los ensayos de Cambridge, Gometz, Munich y Pueblo pésimos resultados, con bajas eficiencias y factores de potencia, pero por aquellas fechas, 1972 a 1974, Laithwaite había inventado un motor lineal de estator corto y de flujo transversal, que además con ciertas disposiciones podía actuar también como levitador. Tomé buena nota de ello y preparé la posible incorporación de ambos al tren monoviga, pero mientras duraba el desarrollo decidí construir el prototipo con tracción rotativa y transmisión hidrostática. Era el

EM 403, homologado por el Ministerio de Transportes en 1989, con triunfo rotundo de mis soluciones, que 10 años antes se juzgaban como inalcanzables por todos los «expertos» ferroviarios de vía ancha y de vía estrecha.

Dos años antes, en julio del 87, cuando el *EM 403* iniciaba su experimentación en Sevilla, decidí dar un nuevo paso revolucionario. Solicitamos Laithwaite y yo al *Programa Eureka* la inclusión de nuestro proyecto de motor lineal de flujo transversal y entrehierro variable, para aplicarlo al monoviga *EM 500* y también al *Eurotrén EM 600*, versión ferroviaria de las técnicas del *EM 403*.

Laithwaite obtuvo rápidamente el interés de la *Eureka Inglesa*. Yo tardé bastante más en obtener el de la *Eureka Spain*, pero el 24 de julio de 1988 obtengo el beneplácito de la Conferencia de ministros del Programa Eureka y el liderazgo del proyecto, sin duda el más avanzado e importante de los 85 proyectos en que España participa, pero quizá el único de liderazgo español.

El motor proyectado tenía un empuje de 9 kN a 300 km/h.

En febrero de 1989, la Uninova de Lisboa y la Politécnica de Madrid se incorporan al Proyecto y, en diciembre de aquel año, entregamos al CDTI el proyecto terminado con la solicitud de una subvención del 70 % para la fase de construcción.

La discusión con el CDTI en relación con sus peregrinas teorías contables, totalmente ignorantes de las directrices del Ministerio de Economía, nos causa un retraso de año y medio.

Afortunadamente, la cátedra de Máquinas Eléctricas de la Escuela Superior de Ingenieros Industriales de Madrid consiguió su colaboración con el entusiasmo de su jefe de Departamento, don Ángel Alonso, y hoy puedo anunciar que estamos terminando la construcción de un modelo a escala reducida, con una potencia de 4 kW (Fig. 3).

5. La filosofía del proyecto

Durante los últimos veinte años se ha adquirido mucha experiencia en el diseño de motores lineales de alta velocidad. Se han invertido en su desarrollo millones de dólares

en diversos países. Hemos podido basarnos en estos conocimientos y experiencias tanto para reducir al mínimo los costes globales como para asegurar con éxito el funcionamiento del motor.

El tipo de motor seleccionado fue el de inducción, en el cual el conductor primario está ubicado en el vehículo y el secundario se reduce a una simple lámina situada en el entrehierro. Este sistema es, por supuesto, preferible al del motor lineal síncrono con conductores activos en la vía, tanto por razones de costo como de fiabilidad y de seguridad. Una vía activa es siempre vulnerable a fragmentos de material ferroso que pueden adherirse a la superficie de la vía antes del paso del vehículo.

Es suficiente con tener en cuenta que el 95 % de los mecanismos de propulsión eléctrica rotatoria que operan en todo el mundo son motores de inducción, para demostrar que las ventajas de la propulsión inductiva deben ser abrumadoras, y éste es también el caso de los motores lineales utilizados para tracción. Son fiables y robustos, los costes de sus raíles son mínimos, no hay necesidad de conmutar la potencia y puede utilizarse la frecuencia normal. Se ha demostrado que, incluso con entrehierros amplios, pueden ser diseñados para ofrecer alta eficiencia y factor de potencia, y de modo que el peso transportado se compare favorablemente con el de los motores rotativos, dado que el conductor secundario no está ubicado en el vehículo y que la velocidad de rodadura de 300 km/h es tan alta como la de un motor rotativo de 4 polos con un rotor de 1 metro de diámetro alimentado por una fuente de 50 Hz. Este tipo de motores pueden diseñarse para proporcionar miles de kW con eficiencias muy superiores al 90 %.

A finales de los años 60 se pensaba que el motor denominado «sandwich», de doble cara, sería la opción natural para los sistemas de transporte de alta velocidad, porque el diseñador podría reducir a la mitad las pérdidas óhmicas primarias, sin que ello conllevara la reducción en el factor de potencia, en comparación con el motor de cara única. Sin embargo, con posterioridad, se comprobó que esto sólo podía conseguirse a cambio de tener que cargar doble peso del primario, con la consiguiente duplicación en los costes por la utilización. También se creía que sería preferible el uso del motor de doble cara, considerando una reducción en el coste de la

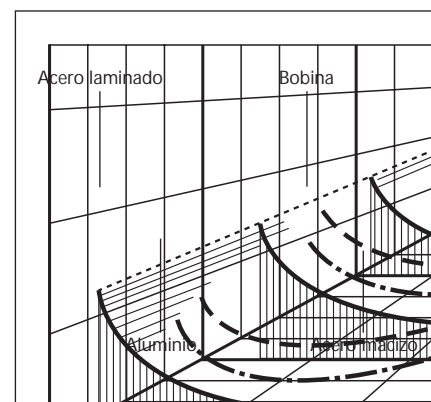


Fig. 3. Motor lineal Eureka EU 277.

vía, dado que no se requería acero para la sección de retorno en el circuito magnético de la vía. Esta aparente ventaja fue desechada completamente por razones de seguridad, ya que una única hoja de aluminio, fijada al terreno por una parte, debido a consideraciones topológicas obvias, sólo puede resistir fuerzas laterales mínimas y resulta, por lo tanto, quebradiza. Sin embargo, si se desea mantener un entrehierro global razonablemente pequeño, las unidades del primario deben estar muy próximas a la placa de reacción secundaria.

Cuando se asumió esto, a mediados de los años 60, se consideraba que impediría por completo el uso de los motores lineales para su aplicación al transporte de alta velocidad, porque se suponía que el motor de cara simple presentaba dos tremendos inconvenientes:

1. Se creía que la atracción magnética, en la dirección normal de la vía, multiplicaría enormemente el peso efectivo del vehículo.
2. También se creía que la considerable distancia entre los polos, requerida para obtener altas velocidades a las frecuencias normales, haría necesario un gran espesor de hierro del secundario en la vía, situando su coste fuera de competencia. La alternativa de utilizar frecuencias más altas incidiría, asimismo, negativamente, por el incremento en los costos para la provisión de convertidores, correctores de capacidad del factor de potencia, acero de mayor calidad y para solventar los problemas de la profundidad del primario, interferencias con cables telefónicos, etc.

El avance crucial se hizo en Manchester en los años 60 y se publicó en un documento de la *Institution of Electrical Engineers* (Laithwaite and Barwell, 1969), donde se mostraba que para todos los mecanismos de inducción (rotatorios o lineales) se mantenía la siguiente relación entre la densidad de flujo en el entrehierro, B , la carga de corriente en el primario, J , la distancia entre polos, p , y la longitud del entrehierro, g , para valores del factor de proporcionalidad, k , los cuales variaban un máximo de sólo $\sqrt{5} : 1$.

$$B/J = kp/g \dots\dots\dots (a)$$

A partir de aquí cambió toda la filosofía del diseño de motores lineales. Hasta entonces se había considerado que el motor lineal nunca podría competir con un motor rotativo en ninguna de sus aplicaciones, dado que siempre sería impracticable que los entrehierros estándar de 1 a 2 mm en los motores rotativos convencionales se pudieran igualar en las versiones lineales, especialmente aquellas en que el conductor secundario completo debía incorporarse como una lámina continua alojada en el mismo entrehierro. Este temor resultaba evidente en el diseño de la lanzadera de aviones Westinghouse «electropult», construida en 1946, en la cual el conductor secundario consistía en barras de cobre y conductores finales colocados en ranuras de una pista de hierro al estilo de los rotores convencionales de jaula.

Hasta ese momento, los experimentadores que utilizaban motores de inducción lineales partían de un diseño convencional de

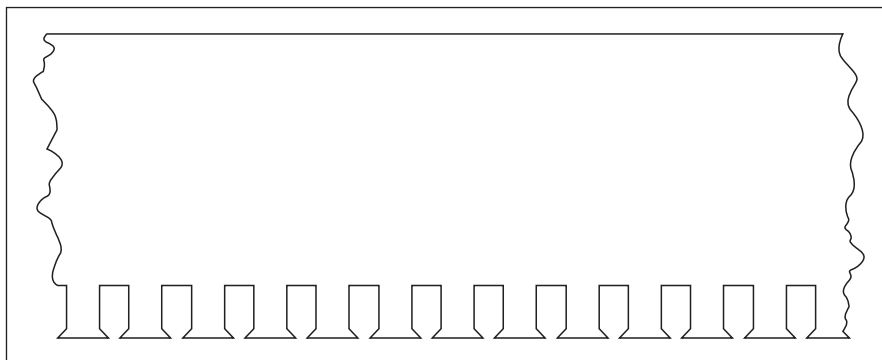


Fig. 4

motor rotativo y simplemente lo «desenrollaban», adoptando idéntica geometría de ranuras y disposición del bobinado primario. El resultado fue una serie de motores con bajo factor de potencia, poca eficiencia, baja relación peso/potencia y alto coste; la totalidad de cuyos defectos se achacaban a la necesidad de incorporar un amplio entrehierro.

Vamos a considerar, por tanto, las implicaciones de la ecuación anterior (a).

En primer lugar, la distancia entre polos, p , requerida para una velocidad síncrona, v_s , de 300 km/h (83,33 m/s), con $f = 50$ Hz, viene dada por:

$$v_s = 2pf; \text{ ó } p = v_s/2f$$

que en el ejemplo elegido da un valor de $p = 0,833$ m, que es muy superior al utilizado en todos los motores rotativos comercializados, excepto en los más grandes (un motor con 4 polos con este paso polar tendría un rotor de más de 1 metro de diámetro).

Por consiguiente, si hemos de comparar un motor lineal de alta velocidad con un motor rotativo de inducción estándar, con un diámetro de rotor de 0,3 m, por ejemplo, el valor de g en la ecuación (a) puede incrementarse a una dimensión de 3 a 6 mm sin afectar en nada la relación B/J .

Pero ahora supongamos que se quiere continuar y dar al entrehierro un valor tan alto como 60 a 120 mm, como podría requerir un motor de cara simple para transporte a alta velocidad. La relación B/J debe ser ahora reducida en un factor del orden de 10 ó más (aprovechando la ventaja de la $\sqrt{5} : 1$ en los valores permisibles de k). Debe recordarse que la salida específica para un motor de inducción es proporcional al producto de B por J y que, por lo tanto, una reducción en una de estas cantidades debe ser compensada por el correspondiente incremento en la otra.

Así pues, abordaremos el problema considerando un diseño convencional «desenrollado», en el que la geometría de la ranura es igual a la anchura de los dientes, la profundidad de la ranura es 3 veces su anchura y la profundidad del núcleo de hierro es proporcional a la suma de las anchuras de todos los dientes en una distancia entre semi-polos.

El primer paso podría ser la reducción de la anchura de los dientes a un quinto de la mostrada en la **Figura 4**. Esto reducirá el valor de la densidad de flujo en el entrehierro (B en la ecuación a) en un quinto, suponiendo que la densidad de flujo en los dientes mismos permanezca invariable. La anchura de la ranura se ha incrementado ahora en un factor de 1,8 para la misma fuga de ranura, puede también incrementarse la profundidad de la ranura en un factor de 1,8, haciendo que el área de la ranura $1,8 = 3,24$ veces mayor, permitiendo la obtención de un factor mejor de cubicado, de modo que el área de conductividad por ranura pueda perfectamente incrementarse hasta 4 veces su valor anterior y también, por lo tanto, el valor de J . Así, se observa que la ecuación (a) proporciona un valor de B/J de 1/20 su valor anterior, lo que supone la más pesimista de nuestras previsiones sobre el valor necesario de g (**Fig. 5**).

La potencia específica se ha reducido únicamente en un 20 %, pero hay que observar el efecto sobre la profundidad del núcleo y, como consecuencia, sobre el peso global. La nueva geometría se muestra en la **Figura 5**, donde la reducción de la profundidad del núcleo en un factor de 5 (la misma proporción que la reducción en los dientes) compensa de sobra el incremento de 1,8 veces en la profundidad de las ranuras y donde el peso del motor se reducirá en un 20 % para corresponder a la reducción en salida. Por tanto, su relación potencia/peso será la misma que la de su equivalente rotativo.

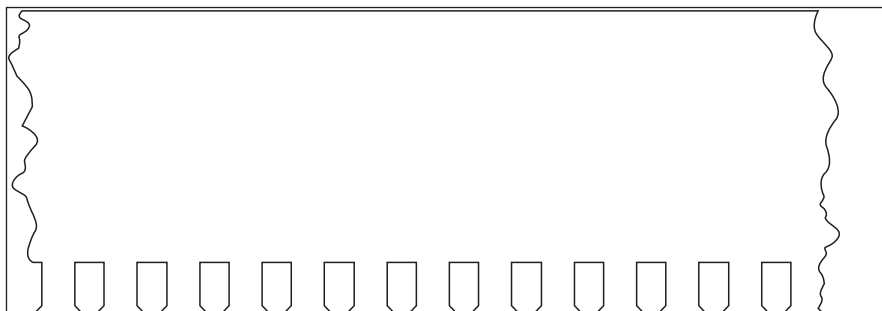


Fig. 5

Pero, además, hay que considerar el efecto sobre la geometría de la vía. La necesidad de una gran plancha de acero para soporte de la lámina de aluminio en un motor de cara simple ya no existe, dado que el espesor del acero no ha de ser necesariamente mayor que el de la profundidad del núcleo. Incluso, teniendo en cuenta que el secundario sólo se requiere para controlar corrientes y flujos con deslizamiento de frecuencia, no hay necesidad de laminar el acero de la vía y sólo hará falta una lámina de chapa de acero de 10 mm de espesor.

6. Atracción magnética

Centrándonos ahora en el problema de las fuerzas de atracción magnéticas, se acostumbra a calcular esta fuerza específica, F_A , como: $F_A = B^2/2 \mu_0$ por unidad de superficie, omitiendo el hecho de que también hay una fuerza de repulsión, F_R , cuyo valor específico es:

$$F_R = \mu_0 J^2/2 \text{ por unidad de superficie.}$$

Los valores típicos de B y J para motores rotativos convencionales justifican la omisión de F_R , ya que para $B = 0,6 \text{ T}$ y $J = 5 \times 10^4 \text{ amp/m}$, F_A será $1,4 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, mientras que F_R se queda en $1,6 \times 10^3 \text{ N/m}^2$, que equivale a solamente un poco más del 1 % de F_A .

Pero, cuando B se divide por 5 y J se multiplica por 4, los valores resultantes serán:

$$F_A = 5,6 \times 10^3 \text{ N/m}^2 \quad F_R = 2,6 \times 10^4 \text{ N/m}^2$$

¡la fuerza de repulsión se ha convertido en dominante! De hecho, con todos los valores de deslizamiento excepto los mínimos, parte del peso del vehículo está, en realidad, siendo desplazado por el motor lineal de cara única.

En 1974, este concepto se extendió a los casos en que el motor lineal de propulsión soportaba todo el peso, y mediante los oportunos cambios topológicos fundamentales, se dispuso para proporcionar una levitación estable en lo que se denominó «río electromagnético» (Eastham & Laithwaite, 1974).

7. Flujo transversal

Mientras que es bastante factible diseñar un motor lineal que, geometría de ranuras aparte, sea convencional en cuanto que represente la versión «desenrollada» de una máquina rotativa, consideramos la posibilidad de utilizar un motor de flujo transversal (TFM), específicamente para su aplicación en máquinas con amplias distancias entre polos, con objeto de reducir el acero en el secundario.

La distancia entre polos calculada anteriormente para esta aplicación concreta (0,833 m) es una de las cuestiones por las que surgen los TFM como opción más rentable que la del tipo normal de flujo longitudinal.

La mayoría de las propiedades del motor, es decir, rendimiento, factor de potencia, relación peso/potencia, etc., no se ven afectadas por la tensión de trabajo que únicamente determina el número de vueltas de cada bobina del primario.

Dado que no es necesaria la refrigeración por agua de los conductores primarios, la selección del número de vueltas no presenta dificultades de fabricación.

Lo que suele ser más importante es el efecto sobre la captación de la corriente, ya

que es mejor captar una corriente más baja a una tensión mayor, y la experiencia nos sugirió que, para nuestro motor, 3.300 voltios (línea) resultaría ser probablemente la más adecuada tensión de trabajo.

Dispusimos, además, un mecanismo automático de variación del entrehierro, actuado a través de un sensor óptico (Patentes de invención Pinto Silva n.ºs 8904409-8904410-9000008).

Para reducir el peso, impusimos que el bloque del estator fuese discontinuo.

Con todo ello conseguimos los resultados de la **Tabla II** siguiente.

TABLA II

Empuje	9,5	kN
Aceleración	0,93	m/s ²
Fases	3	
Tensión	3.300	V
Frecuencia	50	Hz
Velocidad síncrona	92,6	m/s
Velocidad con 10% deslizamiento	83,33	m/s
Espesor del secundario	0,6	cm
Espesor trasdos magnético	1,0	cm
Secundario	Aluminio	
Entrehierro	6,0	cm
Coseno ϕ	0,67	
Corriente de línea	275	Amperios
Rendimiento	0,81	
Peso del primario	1.150	kg
Peso/potencia	1,22	kg/kW
Ancho	0,578	m
Longitud	4,1	m
Número de polos	n = 4	

Expuse estos resultados en la Universidad de Palermo, despertando sensación e interés inusitado, en junio de 1990.

En octubre tuve una reunión con un grupo de profesores de las Universidades de Palermo, Nápoles y Padua, así como con directores de *Ansaldo Trasporti*, en el centro de la Ricerca, en Roma.

El interés fue tan grande que, en diciembre de ese mismo año, fui invitado a visitar la factoría de Ansaldo en Nápoles y se nos encargó el estudio de un motor lineal de 120 kW y 100 km/h, de flujo transversal, para sustituir al de los *People Mover*, de la UTDC.

8. Motores asíncronos de flujo longitudinal

El sistema *HSST* (High Speed Surface Transport), que la Japan Air Lines ha abandonado, vendiéndolo a precio de saldo a varios de sus ex-empleados, tiene propulsión por motor lineal de estator corto, pero de flujo longitudinal.

Este tipo de motor tiene rendimiento del 80% y factor de potencia del 0,3, lo que les obliga a mantener un entrehierro de 9 mm, difícil de conseguir, por lo que su mantenimiento es presumiblemente muy costoso.

9. Motores síncronos de flujo longitudinal

El sistema *Transrapid* está dotado de motores síncronos de flujo longitudinal.

Los motores síncronos fueron adoptados porque sus rendimientos y factores de potencia eran muy superiores a los de los asíncronos, en 1970, pero al costo enorme de convertir la vía en un gigantesco estator, con una resistencia magnética de 4 kg/t, a 300 km/h, superior a la resistencia de las ruedas a las que sustituye, y un peso de 291 t/km de chapa magnética y de 35 t/km de cobre, lo que supone por este concepto un costo de 244 millones de pesetas/km de vía doble. Los patines de acero laterales para soportar el «aterrizaje» del vehículo y las T de guiado transversal, suponen un peso añadido de 340 t/km de acero estructural y un coste de 54 millones de pesetas/km adicional.

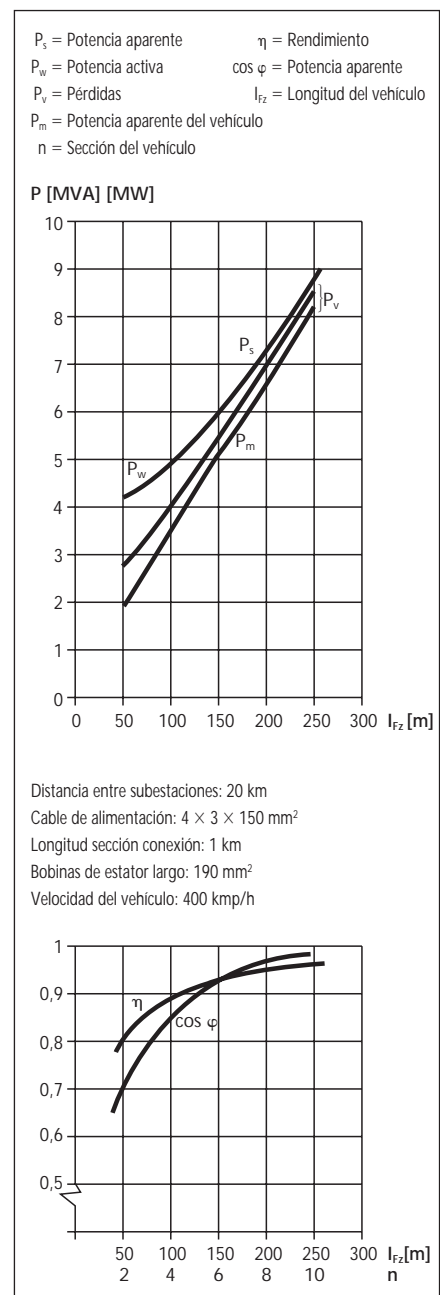


Fig. 6

En total la estructura se recarga con un peso propio de 16 toneladas por vano de 25 metros (0,35 del peso del vehículo) y un coste adicional de 298 millones de pesetas/km de materiales, sin contar mano de obra.

A ello hay que añadir subestaciones eléctricas de alimentación y control, cada dos km de media, para potencias de 8 Mw.

A pesar de ello, los rendimientos y factores de potencia son, para un vehículo de 50 m:

$$\eta = 0,78 \text{ y } \cos \varphi = 0,65$$

Con vehículos de 150 m, se llega a:

$$\eta = 0,92 \text{ y } \cos \varphi = 0,92$$

pero tales longitudes de vehículos requieren altas demandas de transporte.

La vía ha de ser construida y mantenida con precisiones de 1 y 2 mm, lo que aumenta los costes (Fig. 6, según Transrapid).

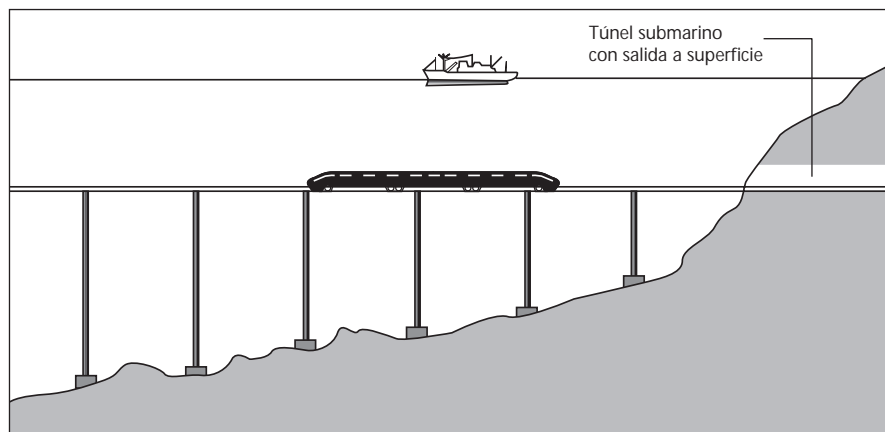


Fig. 7

10. Otras aplicaciones de la tracción lineal

El paso fijo del Estrecho por Monoviga Submarino

En 1988, presenté al Rey de Marruecos, a través de una alta personalidad, mi propuesta para el paso fijo del estrecho de Gibraltar, según las Figuras 7, 8 y 9.

Se trata de una monoviga de hormigón pretensado o de acero, en forma de viga-cajón, que, anclada por cables al fondo marino, sustenta un vehículo submarino guiado, cuyas ruedas de sustentación soportan contra el trasdós de la viga al vehículo submarino, que el agua empuja hacia arriba y que irá propulsado por motores lineales de flujo transversal.

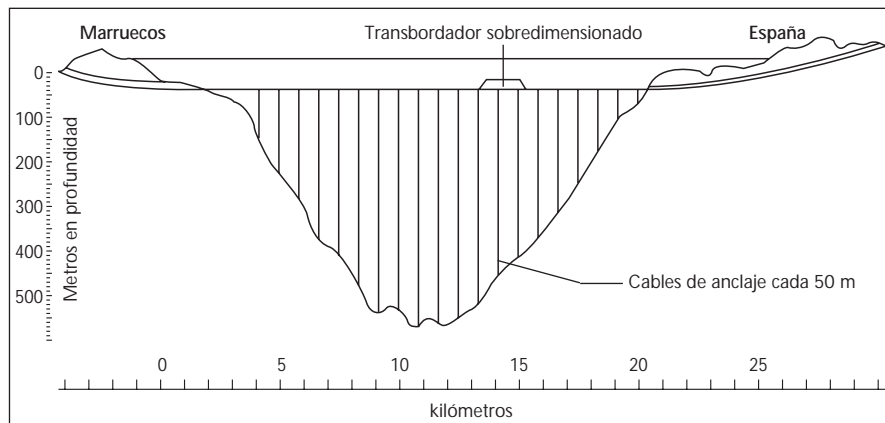


Fig. 8

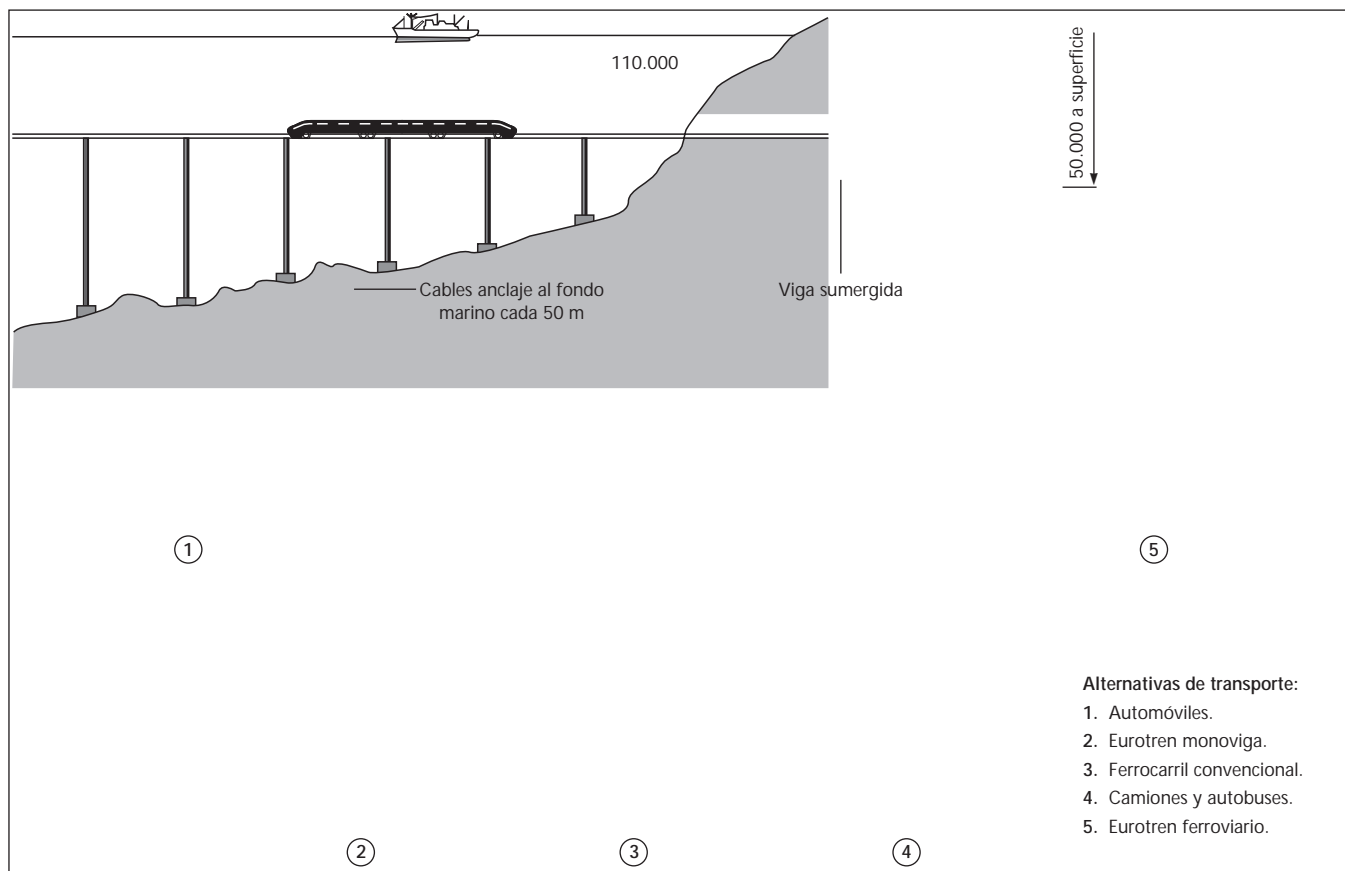


Fig. 9

- Alternativas de transporte:
1. Automóviles.
 2. Eurotren monoviga.
 3. Ferrocarril convencional.
 4. Camiones y autobuses.
 5. Eurotren ferroviario.

Ascensor lineal

Igualmente, la aplicación de un motor lineal de flujo transversal a las cabinas de los ascensores y, en tamaño gigante, a las máquinas de extracción de minas y a los planos inclinados, abre enormes posibilidades. Naturalmente, los cables de elevación serían sustituidos por cables continuos compensados.

Tracción mixta rotativo-lineal

La aplicación del motor lineal transversal a las rampas inclinadas de los ferrocarriles, sobre todo los de alta velocidad, como elemento reforzador de la tracción, permitiría disminuir los costos de construcción de la vía, al necesitar una menor adecuación de la orografía al trazado.

11. La sustentación magnética

He hecho alusión a ella en varias ocasiones. De los 18 modos aludidos anteriormente como posibles, son 4 los que se han ensayado con continuidad en los últimos 20 años:

Sustentación por atracción

Es el caso que ya he citado de los vehículos alemán y japonés de la **Tabla I**.

Bobinas alimentadas por corriente continua, variable mediante oportunos sensores, y fijadas a aletas inferiores del vehículo, son atraídas contra el estator del primario del motor de tracción, en el caso de motores síncronos, o contra el trasdós del secundario magnético de los motores de tracción asíncronos, con una fuerza elevadora de 2,5 toneladas por metro lineal del tren (en el *Aerotrains* de Berlín y en el *Hovertrain* de Laithwaite era de sólo 1,25 toneladas por metro lineal de tren).

Esta fuerza es inestable, pues a medida que el vehículo asciende o desciende, por irregularidades de la vía o por las transiciones de rampas/pendientes, varía consecuentemente el entrehierro (del orden de 10 mm), provocando el contacto entre vía y magnetos o entre los patines del vehículo y la cabeza de la vía, respectivamente.

Para evitarlo hay que variar la excitación, que se controla mediante sensores en un margen de ± 5 mm, variando la excitación en la relación de 3/1.

Bastan 20 milisegundos de falta de corriente en los magnetos elevadores para provocar el «aterrizaje» del vehículo contra la vía, lo que obliga al montaje de pesadas baterías de Ni-Cd.

Los magnetos de sustentación totalizan 22 toneladas, y los de guiado, 15 toneladas. Unido al peso de las baterías y los captadores y generador lineal para la recarga de baterías, se alcanza un peso de 66 toneladas, aproximadamente el 66% de la tara del tren. Y téngase en cuenta además que el peso del estator situado en la vía es de 20 toneladas/tren, al que hay que sumar el peso de 16,5 km de cable de cobre de 150 mm² de sección.

Son de gran inestabilidad, requiriendo amplificadores que trabajan a 1.000 Hz.

Sustentación por repulsión del motor de flujo transversal

Fue descubierta por Laithwaite y Eastham, y denominada *río magnético*, pero sólo experimentada en modelos de laboratorio.

Está siendo desarrollada por **Eurotrén Monoviga, S. A.**, como una consecuencia lógica del desarrollo del motor de flujo transversal de entrehierro compensado y núcleo discontinuo, contemplado en el acuerdo de colaboración Eurotrén Monoviga-Universidad Politécnica (**Patentes Pinto Silva**).

En esencia, el *río magnético* es la combinación del empuje axial propulsor y de la sustentación y guiado análoga a la sustentación electrodinámica, **pero prescindiendo de los criogénicos**. Es, por lo tanto, un sistema de repulsión, con altura de elevación de 100 a 150 mm, donde las pérdidas de arrastre que aquellos presentan inevitablemente, se aprovechan como empuje.

De cumplirse nuestras expectativas, los sistemas electrodinámicos y electromagnéticos quedarían obsoletos.

En las **Figuras 10, 11 y 12** se muestra la disposición de tal motor-sustentador.

Sustentación por imanes permanentes

Ha sido utilizada por Heidelberg en el *M-Bhan*, pero todavía adolece de problemas, por lo que han sido clausuradas las líneas de 1,5 km existentes en Berlín y Las Vegas, esta última incluso antes de la inauguración.

El sistema está constituido por un motor síncrono de estator largo, cuya excitación se realiza por imanes permanentes, que actúan simultáneamente como sustentadores del vehículo del que son solidarios.

Tal disposición permite aligerar el vehículo, pero la inestabilidad lateral es muy alta. Ello ha obligado a disponer servomecanismos estabilizadores, volviendo a utilizar el viejo concepto de bogies portadores, con ruedas de acero de pequeño diámetro, no portantes (salvo emergencias, en cuyo caso se vuelve a las cargas concentradas, con su acostumbrada incidencia en la infraestructura portante), que realizan la estabilización horizontal y vertical.

Pero tales ruedas son precargadas por contrarruedas de guiado, que provocan el efecto de aumentar la tara del vehículo, con lo que desaparece el ahorro de tara que se perseguía al situar el primario en la vía.

Para los imanes permanentes hay que recurrir a la utilización de aleaciones de tierras raras (cobalto, ferritas de estroncio o cerámicas de neodimio-hierro-boro), con precios de 50.000 ptas./kg.

Fig. 10

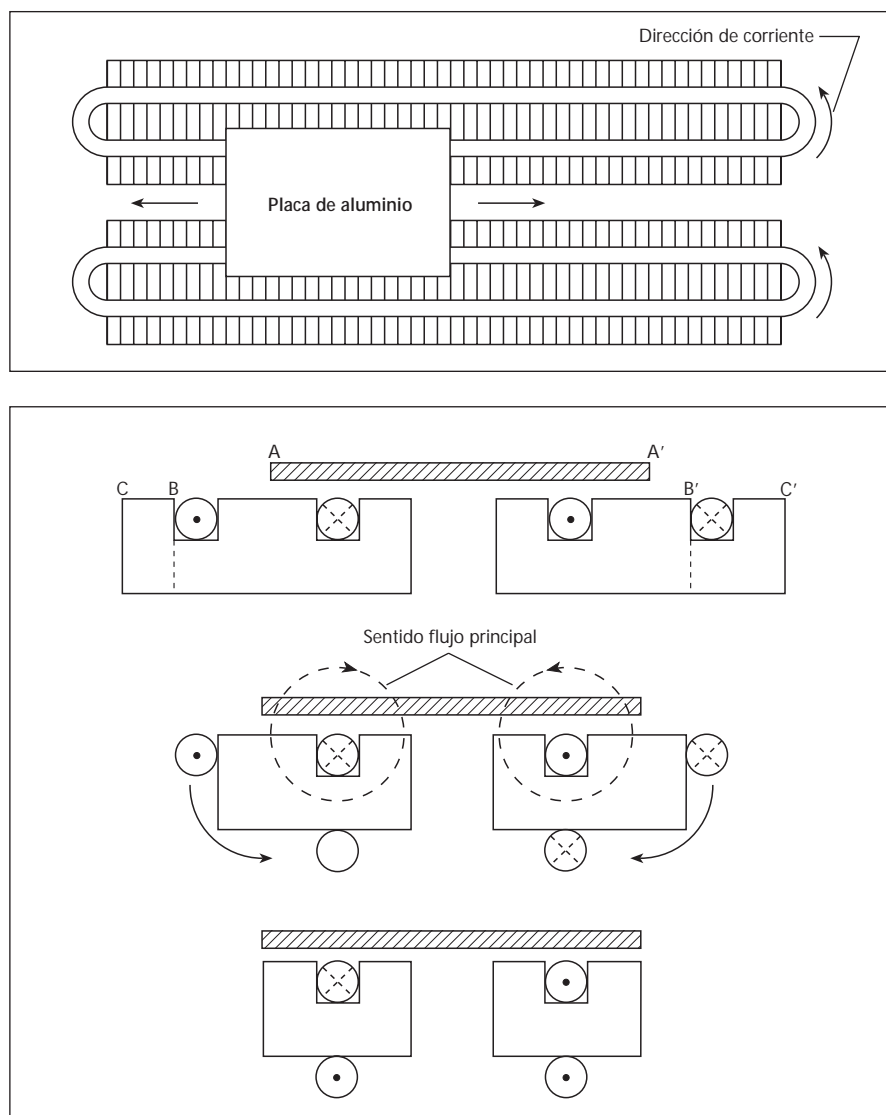


Fig. 11

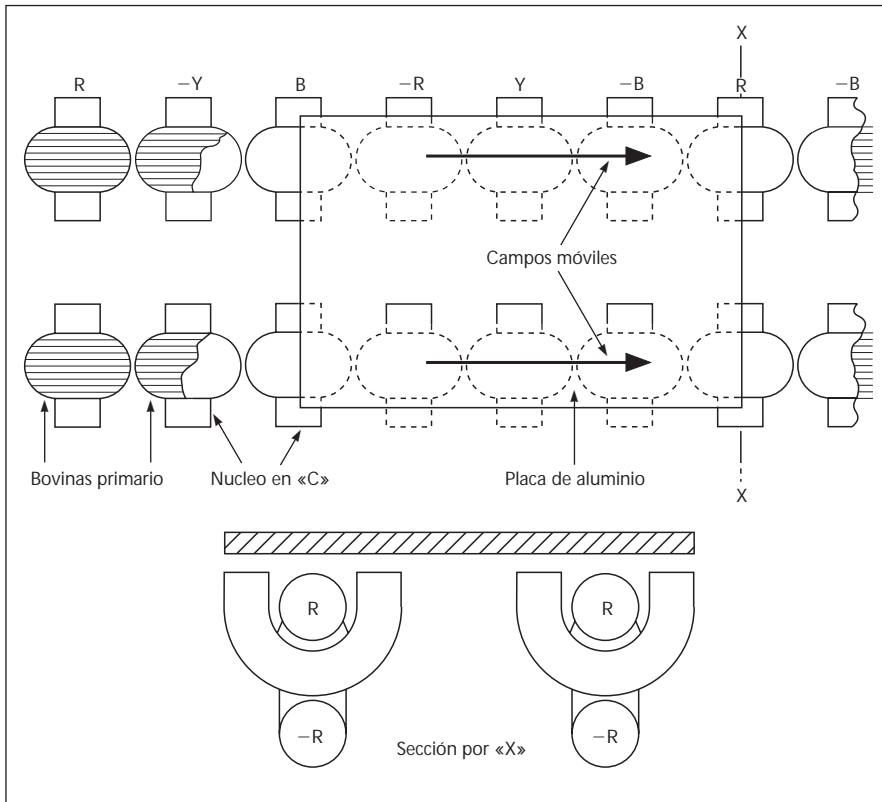


Fig. 12

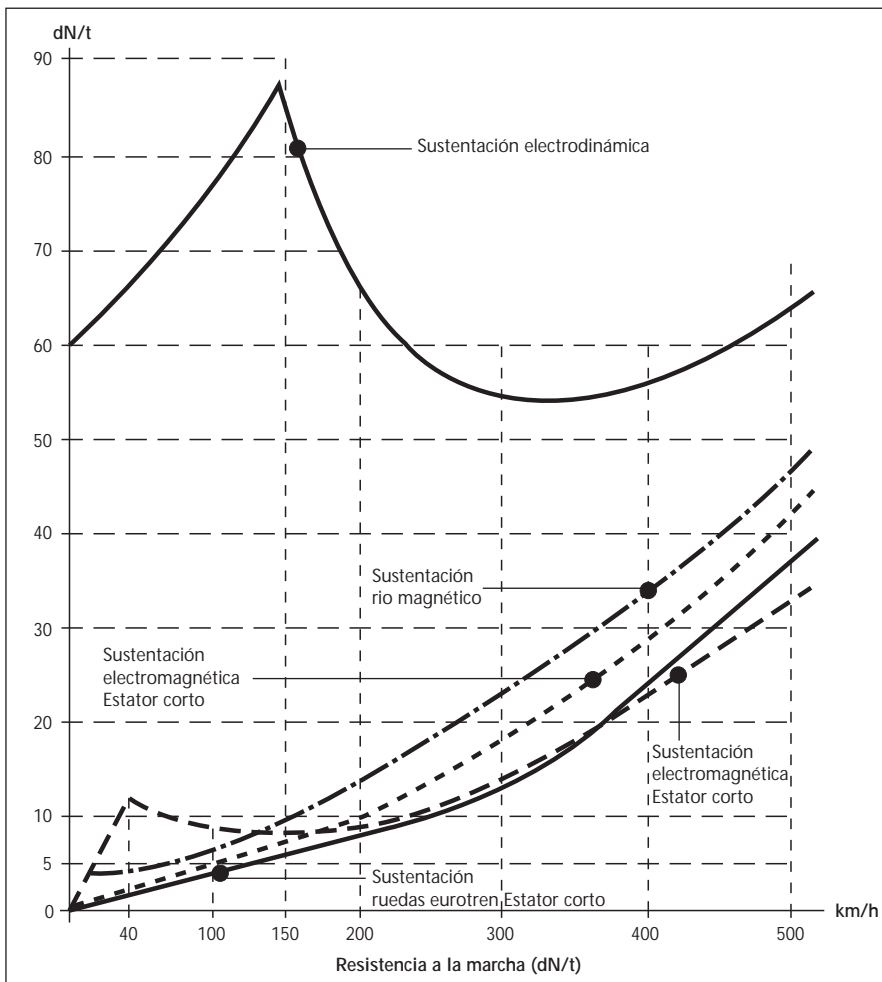


Fig. 13

Sustentación por repulsión electrodinámica

En este sistema, que fue iniciado por Thorton en la Universidad de Standford, en 1970, y por la JNR, hacia las mismas fechas, el vehículo lleva a bordo un sistema de bobinas primarias contenidas en tanques criogénicos (helio líquido 3 °Kelvin).

En el fondo de la vía, sin hierro, se disponen bobinas pasivas secundarias. Ambas bobinas son recorridas por corrientes de 10.000 a 100.000 amperios, obteniéndose elevaciones del vehículo de 100 a 200 mm. No obstante, por debajo del 40 % de su velocidad máxima, la sustentación es inferior a su peso, por lo que es necesario disponer ruedas de sustentación y de guiado lateral.

El vehículo es propulsado por un devanado estatórico, de estator largo dispuesto a lo largo de la vía y alimentado desde el exterior, constituyendo un motor síncrono sin hierro.

La corriente que recorre el estator del motor síncrono induce corrientes en las bobinas primarias a bordo del vehículo, las cuales determinan tanto las fuerzas de sustentación como las de guiado lateral, que actúan sobre las correspondientes bobinas cerradas situadas en la vía.

En cuanto a la potencia requerida en la sustentación, para los sistemas electromagnéticos, sus autores hablan de 1 a 2 kW/tonelada.

En los sistemas de *río magnético*, Laithwaite mantiene que la potencia de sustentación es cero, si bien la diferente altura de sustentación afecta al factor de potencia del motor transversal de propulsión.

12. Conclusiones

Todo cuanto he dicho sobre la sustentación supone una alta sofisticación para encontrarle un sustituto a las ruedas metálicas y neumáticas, desahuciadas en 1955.

Pero, en 1988, por vez primera, un tren *Ice* alemán batió, utilizando bogies articulados, parecidos al que yo ofrecí a British Railway y a la RENFE en 1977, la velocidad de 408 km/h.

Luego el desahucio fue prematuro.

¿Cuál es el coste?

La rueda metálica ofrece una resistencia a la marcha de 2 a 15 kg/tonelada, hasta 400 km/h. La rueda neumática ofrece de 8 a 20 kg/tonelada, hasta 200 km/h (Fig. 13).

Las sustentaciones magnéticas y electrodinámicas ofrecen resistencias magnéticas de 15 a 90 kg/tonelada, es decir **consumen mucha más energía por pasajero/km**. Luego, el cambio en la sustentación no está justificado.

Pero, a pesar de ello, la sustentación por levitación tuvo la virtud de acelerar los necesarios cambios topológicos que hicieron rentables los motores lineales que, de modo excluyente, aquella necesitaba.

Pues bien, indispensable o no la sustentación magnética, mi Compañía no ha querido rehusar el reto y podemos ofrecer hoy todas las soluciones de la técnica, de forma indistinta, de acuerdo con los gustos de nuestros clientes, con la seguridad de que sea cualquiera la variante elegida nuestras soluciones serán las mejores y las más racionales.