

Dispositivo regulador de velocidad y recuperador de energía cinética de frenado (*)

Por JOSE SERRANO CAMARASA

Dr. Ingeniero de Caminos, C. y P.
Director de Investigación de INYPSA.

En el número de agosto de la revista *La energía Española*, se publicó el artículo del mismo autor: "El convertidor giroscópico de energía de valle en energía de punta", máquina que a juicio de su autor podrá substituir en el futuro, con ventajas operacionales y económicas, alguna de las funciones más características de las centrales hidroeléctricas reversibles (ver figura 3 del presente trabajo).

En el presente escrito se representan y enumeran, asimismo, los elementos integrantes del embrague magnético aplicable al convertidor giroscópico (cuya variante E, perfeccionada (figura 2) va a ser objeto de ensayo con ayuda del CDTI) y se hace especial hincapié en las enormes posibilidades que ofrece este tipo de embrague para simplificar la mecánica de transmisión motriz en dispositivos más complejos, permitiendo ahorros de energía y de potencia en los sistemas que se caractericen por sus frecuentes arranques y frenados (ver figura 1).

A título de ejemplo, se estudia la aplicación de un regulador de velocidad de este tipo en la explotación de un imaginario ferrocarril suburbano rápido, multitudinario, utilizable por un pasaje de un millón de viajeros por día.

Con la aplicación de estas técnicas se espera conseguir sensibles mejoras en los transportes urbanos y ahorros importantes de energía y potencia de arranque, respecto de otras soluciones alternativas más convencionales.

1. PERDIDAS DE ENERGIA CINETICA

En muchos sistemas mecánicos se producen grandes gastos y graves problemas de funcionamiento por pérdidas y disipación de la energía cinética de que están dotados algunos de sus elementos, sometidos a fuertes cambios de velocidad.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista, hasta el 31 de agosto de 1979.

Como ejemplo típico de tales sistemas, con disipación de grandes cantidades de energía, en pura pérdida, nos vamos a referir a continuación al caso concreto de vehículos de transporte urbano en los que se producen gran número de arranques y frenados, lo que siguiendo la práctica actual obliga además a sobredimensionar sus motores y a dotarlos de reguladores de velocidad, a veces complicados, que merman considerablemente su rendimiento efectivo.

El dispositivo que describiremos a continuación permite, además de regular de forma sencilla la velocidad de los móviles, almacenar y más tarde utilizar una parte de la energía cinética entregada por el móvil en cada frenado y reducir considerablemente la potencia motriz instantánea de nueva generación requerida para el relanzamiento del vehículo tras el precedente frenado; con ello se consigue la descarga del motor del primer esfuerzo de aceleración, permitiendo al vehículo recuperar en forma gratuita e inmediata una parte importante de la velocidad de que antes del frenado estaba animado; lo que se traduce en ahorros de potencia motriz respecto de prestaciones similares con idénticos tiempos de relanzamiento.

2. DESCRIPCION DEL DISPOSITIVO PROPUESTO

Con ayuda de la figura 1, que lo mismo puede representar un alzado vertical del dispositivo (en este caso, volante de eje vertical), o bien una planta (eje de volante horizontal) pasamos a describir la máquina.

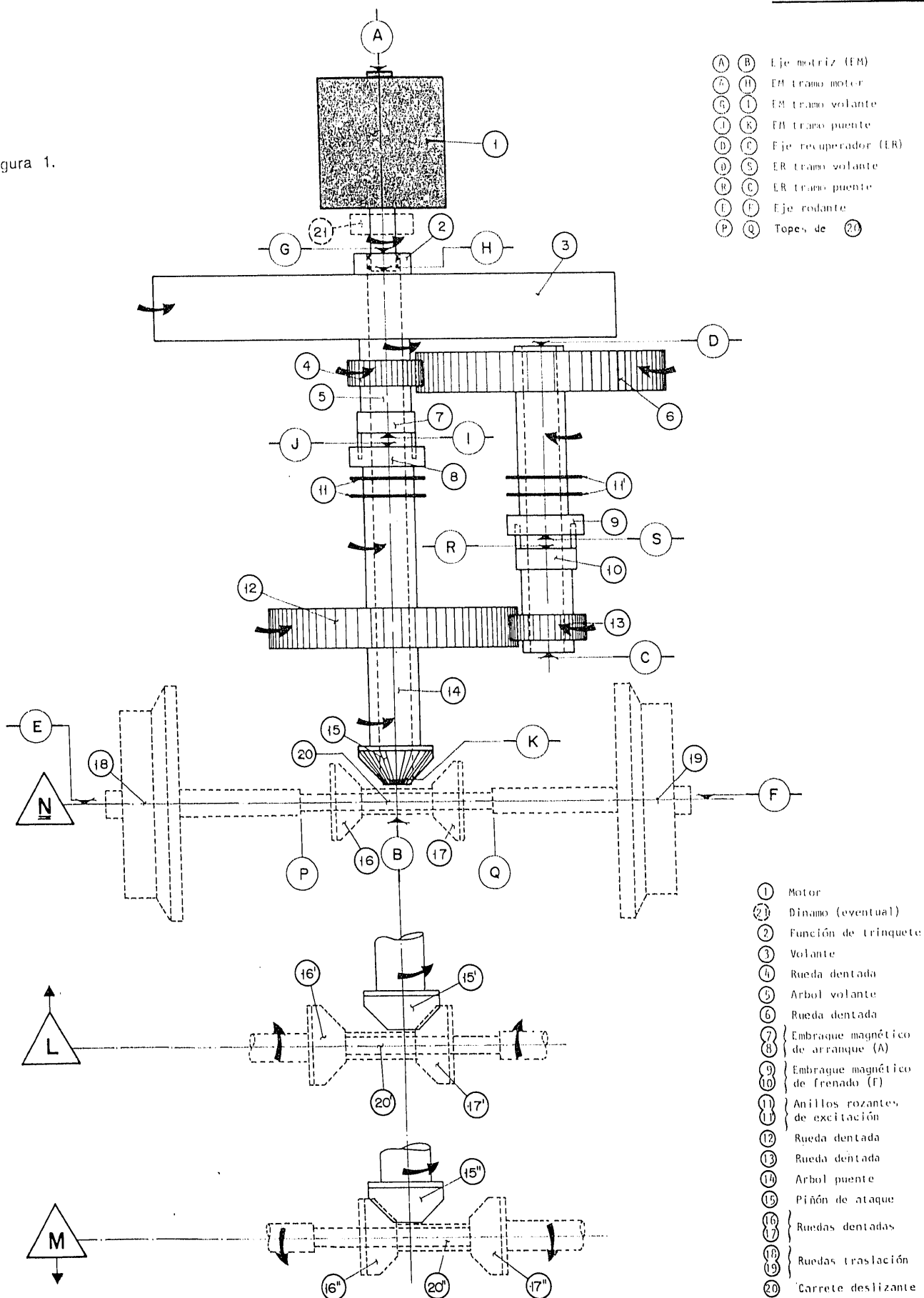
En (1) se representa el motor, que puede ser de cualquier tipo (de explosión, de turbina, eléctrico, etc.) pudiendo girar siempre en el mismo sentido y a velocidad nominal uniforme, excepto en el primer arranque de cada jornada o viaje, lo que permite la aplicación de motores eléctricos síncronos, preferiblemente trifásicos y de tipo convencional.

En (2) se representa un embrague de trinque-

DISPOSITIVO REGULADOR DE VELOCIDAD Y RECUPERADOR DE ENERGIA

REGULADOR DE VELOCIDAD CON RECUPERACION DE ENERGIA CINETICA DE FRENADO

Figura 1.



tes, que permite el arrastre del árbol del volante G-I por el A-H del motor, sin provocar el arrastre inverso cuando el árbol volante adquiriera mayor velocidad que el motor.

El volante (3) está calado en el árbol G-I (representado hueco), que se remata con una platina (7) la cual juntamente con la (8) terminal del árbol J-K integran un embrague magnético de alto rendimiento. Este embrague permite el arrastre del árbol J-K, principal de la máquina de que se trate, por el árbol del volante G-I con velocidades de giro distintas entre sí, regulables a voluntad. Por lo tanto, cumple la misión de regulador de velocidad de la máquina principal, haciendo esta velocidad independiente de la de giro del motor.

El citado embrague magnético se alimentará de corriente eléctrica a través de anillos rozantes (11) que se conectan a una fuente de energía por intermedio de un regulador de intensidad.

La excitación se hará mediante corriente continua, que podrá obtenerse por rectificación de la alterna de red o bien mediante una dinamo (21), cuyo rotor cabría montar sobre el árbol del motor.


Calada en el árbol (G-I) del volante se monta una rueda dentada (4) de radio eficaz r_{11} , que engrana con otra rueda (6) de radio eficaz r_{12} , que se hallará calada a su vez en un árbol auxiliar multiplicador cuyo eje es C-D.



La rueda (6) es arrastrada en su giro permanentemente por la (4).

Calada en el tramo de árbol J-K se monta una rueda dentada (12) —de radio eficaz r_{12} — que engrana y arrastra en su giro a la rueda (13) calada en el tramo R-C del árbol multiplicador con eje C-D.


En este eje C-D existe otro embrague magnético, formado por las dos platinas terminales (10) y (9), que funciona al excitarse con corriente tomada a través de los anillos rozantes (11'). Este embrague en cierto modo es antagónico del embrague (7)-(8) y precisamente funcionará en los frenados cuando el (7)-(8) esté desexcitado.



El embrague (10)-(9) actúa como regulador de velocidad durante la primera fase del frenado.

En el caso de que el árbol principal motriz de la máquina (J) (K) sirva para accionar la ruedas de traslación de un vehículo podría rematarse por su extremo (K) con un piñón (15) que pueda engranar con cualesquiera de las dos ruedas dentadas cónicas situadas en los extremos de un carrete deslizante (20) que se hallará calado en el árbol de ruedas E-F, pero con posibilidad de desplazarse axilmente entre dos posiciones límites con topes en (P) y (Q), al objeto de permitir al vehículo mantenerse inmóvil (posición ) o

bien en marcha hacia A (posición ) , o bien hacia B (posición ) .

3. FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO

Se lanza el motor (1) hasta su velocidad de régimen, hallándose desexcitados ambos embragues magnéticos y el carrete (20) en posición  de parada.

Si se desea una marcha hacia adelante se lleva el carrete 20' a la posición indicada en  y a partir de entonces se puede excitar progresivamente el embrague (7)-(8) con lo que se iniciará el giro del árbol (14) y se alcanzará la velocidad de avance requerida en el vehículo. Para la marcha atrás se pone en posición .

Cuando se desee frenar, se desexcita el embrague (7)-(8) y se excita progresivamente el (9)-(10).

A una velocidad angular W_{11} del eje (14) corresponderá otra W_{10} de la platina 10, tal que:

$$W_{10} = \frac{r_{12}}{r_{13}} \cdot W_{11}$$

La velocidad W_9 de giro en la platina (9) será una fracción de la anterior, o sea:

$$W_9 = X \cdot W_{10} = X \cdot \frac{r_{12}}{r_{13}} \cdot W_{11}$$

en cuya fórmula, X será inferior a la unidad. A esta misma velocidad girará la rueda 6, por hallarse calada en el mismo árbol. En este caso el volante giraría a una velocidad:

$$W_3 = X \cdot \frac{r_{12}}{r_{13}} \cdot \frac{r_6}{r_4} \cdot W_{11}$$

4. UN EJEMPLO DE FUNCIONAMIENTO

A título de ejemplo admitamos que se tratara de un ferrocarril suburbano.

Queremos aclarar que normalmente en líneas ferroviarias electrificadas a c/c se produce ya cierta recuperación de energía de frenados, al ser los motores generadores reversibles y actuar el sistema productor eléctrico en su conjunto como volante regulador, pero obliga a suministrar a cada coche el 100 por 100 de su potencia de arranque. Aun a sabiendas que no sea aplicable a todos los

DISPOSITIVO REGULADOR DE VELOCIDAD Y RECUPERADOR DE ENERGIA

casos, se prescinde en adelante de considerar la recuperación de energía en los sistemas preexistentes, porque —en contrapartida— los motores a c/c utilizados hasta el presente son, en general, de peor rendimiento que los de corriente alterna trifásicos, síncronos —que propugnamos— y presentan mayores problemas de explotación y mantenimiento; de manera que las ventajas del cambio siguen siendo manifiestas y las economías estimadas del mismo orden de magnitud que las que aquí se calculan.

I. Características supuestas en los coches automotores.

a) Peso total del coche: 20 Ton (+ 1 Ton al añadir este dispositivo) que se descompone en una tara de 13 Ton (+ 1) y una carga útil de 100 pasajeros a 70 Kg = 7.000 Kg, lo que hace una suma total de 20.000 Kg.

La tara por pasajero será de: $\frac{13.000}{100} = 130$ Kg.

El peso total por pasajero de 200 Kg (con el 100 por 100 del pasaje) y de $\frac{13.000 + 50 \times 70}{50} = \frac{16.500}{50} = 330$ Kg/pasajero con el 50 por 100 de las plazas ocupadas (+ 1 Ton por el regulador añadido).

b) Velocidad nominal de giro del motor:

$$750 \text{ r.p.m. } < > 12,5 \text{ r.p.s.}$$

c) Radio eficaz de las ruedas 0,50 m.

d) Volante de 500 Kg de peso, con radio eficaz de giro de 0,60 m (1,50 m \varnothing caja de carcasa).

e) Relación de radios: $\frac{r_{12}}{r_{13}} = \frac{r_{16}}{r_1} = 5$.

f) Rendimiento máximo de los embragues:

$$\frac{W_8}{W_7} = 0,97 \quad ; \quad \frac{W_9}{W_{10}} = 0,93$$

g) Velocidad máxima: 110 Km/h $< >$ 30,56 metros por segundo.

h) Aceleración máxima con pendiente de 0,005: 1,2 m/seg².

i) Resistencia específica total al avance a 110 Km/hora en horizontal: 0,015 (se supone idéntica a cualquier otra velocidad).

g) Recuperación cinética previsible: 70 por 100 de la disponible.

II. Características de la línea supuesta.

a) Estaciones a 1 Km de distancia media.

b) Pendientes máximas del perfil: 0,015.

c) Rampa media eficaz de 0,005.

d) Recorrido total de cada línea: 20 Km.

e) Trayecto medio recorrido por pasajero: 6 kilómetros.

f) Parada media en estación: quince segundos.

g) Grado medio de utilización de plazas: 40 por 100.

h) Frecuencia media de paso de trenes: un tren cada cinco minutos (variable a lo largo del día).

i) Jornada de funcionamiento: 19 horas/día.

j) Composición de trenes: variable en el horario, de dos a cuatro coches.

k) Energía motriz eléctrica alterna trifásica, utilizando motores síncronos trifásicos convencionales, en corto circuito con trole y líneas de contacto de pletinas de aluminio en disposición triangular, según experiencias de la casa Merlin Guérin.

Bajo los anteriores supuestos calcularemos a continuación:

A) Potencias teóricas y prácticas en lanzamiento y para marcha de régimen con y sin el dispositivo recuperador propuesto.

B) Energías consumidas por cada coche en arranques y traslación entre estaciones y ahorro medio contando con el dispositivo recuperador.

C) Energías consumidas en tracción por pasajero y trayecto medio.

D) Velocidades comerciales. Capacidad de transporte por línea.

E) Parque móvil y líneas exigidas para servir a un millón de pasajeros por día.

F) Consumos diarios de energía para el millón de pasajeros por día.

G) Demanda global de potencia.

H) Valoración de los ahorros de potencia y energía en el sistema.

I) Comprobación de las velocidades del volante y vehículo.

J) Grado de fiabilidad de las estimaciones económicas precedentes.

DISPOSITIVO REGULADOR DE VELOCIDAD Y RECUPERADOR DE ENERGIA

III. Características de explotación calculadas.

A) Potencias teóricas y prácticas de motores:

a-1) En lanzamiento (sin recuperador cinético).

Peso del coche: 20 Ton.

Energía de aceleración: $E = \frac{1}{2} M V^2$ y teniendo

en cuenta que $M = \frac{20.000 \text{ Kg}}{g}$; $V = 30,56$ metros por segundo ; $30,56^2 = 933,91$

$g = 9,81$; $1 \text{ kWh} < > 366.847,8 \text{ Kg.m.}$

$$E_{\text{kWh}} = \frac{20.000}{19,62} \cdot \frac{933,91}{366.847,8} = 2,60 \text{ kW.h.}$$

Tiempo necesario para alcanzar la velocidad de 30,56 m/seg, con aceleración de 1,2 m/seg²:

$$V = at ; 30,56 = 1,2 t ; t = \frac{30,56}{1,2} = 25,47 \text{ seg.}$$

$$\text{Potencia: } \frac{\text{Energía}}{\text{Hora}} = \frac{2,60 \times 3.600}{25,47} = 367,49$$

kilovatios.

$$\text{Trayecto de lanzamiento: } L = \frac{1}{2} \times at^2 = \frac{1,2}{2} \times 25,47^2 = 389,23 \text{ m.}$$

Energía consumida en rodar el trayecto de lanzamiento L:

$$\frac{\text{Peso} \times (\text{Res. específica} + \text{Pendiente}) \times \text{Recorrido}}{366.847,8} = \frac{20.000 \times (0,015 + 0,005) \times 389,23}{366.847,8} = 0,42 \text{ kWh.}$$

Potencia media requerida para realizar este trabajo en 25,47 segundos:

$$\frac{0,42 \times 3.600}{25,47} = 59,36 \text{ kW}$$

P_t = Potencia teórica total en arranques:

$$367,49 + 59,36 = 426,85 \text{ kW}$$

Potencia efectiva P_r en motores, contando con un rendimiento electromecánico del 0,85 (*): $P_{r1} =$

$$= \frac{426,85}{0,85} = 502,18 \text{ kW.}$$

a-2) En lanzamiento, contando el 70 por 100 de recuperación de la energía de frenado precedente.

Peso del coche con equipo recuperador cinético: 21 Tn.

$$\text{Energía en aceleración: } \frac{2,60 \times 21}{20} = 2,73 \text{ kWh.}$$

$$\text{Energía en rodadura durante el lanzamiento: } \frac{0,42 \times 21}{20} = 0,44 \text{ kWh.}$$

$$\text{Energía total en lanzamiento: } 2,73 + 0,44 = 3,17 \text{ kWh.}$$

$$\text{Energía cinética recuperable: } 0,7 \times (2,73 - 0,44) = 1,60 \text{ kWh.}$$

$$\text{Energía media adicional para el nuevo lanzamiento: } 3,17 - 1,60 = 1,57 \text{ kWh.}$$

$$\text{Potencia teórica equivalente: } \frac{1,57 \times 3.600}{25,47} = 221,91 \text{ kW.}$$

$$\text{Potencia efectiva en motores: } \frac{221,91}{0,85} = 261,07$$

kilovatios.

Ahorro en la potencia de lanzamiento:

$$502,18 - 261,07 = 241,11 \text{ kW.}$$

b-1) Potencia necesaria para la marcha de régimen (sin recuperador cinético) y remontando rampas de 0,015.

$$P_{t,r1} = \frac{20.000 \times 0,030 \times 110.000}{366.847,8} = 179,91 \text{ kW.}$$

$$P_{e,r1} = \text{Potencia efectiva del motor: } \frac{179,91}{0,85} = 211,66 \text{ kW}$$

b-2) Potencia efectiva en marcha de régimen con recuperador cinético.

$$P_{r,e1} = \frac{21}{20} \times 211,66 = 222,24 \text{ kW.}$$

(*) En el caso de alimentación con c/c, se obtendría un rendimiento global más bajo, al exigir subestaciones rectificadoras y transformadoras y líneas auxiliares a c/c privadas del ferrocarril y utilizar motores de peor rendimiento.

DISPOSITIVO REGULADOR DE VELOCIDAD Y RECUPERADOR DE ENERGIA

En ambos casos prevalecen las potencias de lanzamiento sobre la de marcha de régimen remontando rampas del 15 por 100.

Con recuperador de energía resultará por tanto una potencia específica por tonelada de peso de $\frac{261,07}{21} = 12,43$ kW/Tn muy moderada para las aceleraciones, pendientes y taras supuestas.

B) *Energías consumidas por cada coche en el trayecto entre estaciones.*

Recorrido medio entre estaciones: 1.000 m.

Recorridos en lanzamientos y frenados $2 \times 389,23 = 778,46$ m.

Recorridos en marcha de régimen (110 kilómetros por hora) = $1.000 - 778,46 = 221,54$ m.

Consumos de energía en estos últimos, que se recorren en $\frac{221,54}{30,56} = 7,25$ seg.

a) *Sin recuperación cinética:*

$$\text{Energía teórica: } \frac{20.000 \times 0,02 \times 221,54}{366.847,8} = \frac{88,616}{366.847,8} = 0,2416 \text{ kW.h.}$$

b) *Con recuperación cinética:*

$$\text{Energía teórica: } 0,2416 \times \frac{21}{20} = 0,2537 \text{ kW.h. (teóricas).}$$

$$\text{Energía total consumida: } \frac{0,2537}{0,85} = 0,30 \text{ kW.h.}$$

Consumos reales de energía:

Sin recuperación cinética:

$$\begin{aligned} \text{En tramos de lanzamiento: } & \frac{2,60 + 0,42}{0,85} = 3,55 \text{ kWh.} \\ \text{En recorridos de régimen: } & 0,28 \text{ kWh.} \\ \text{Suma} & \underline{3,83 \text{ kWh.}} \end{aligned}$$

Con recuperación de 0,7:

$$\text{En lanzamiento: } \frac{1,57}{0,85} = 1,85 \text{ kW.h.}$$

$$\text{En tramos de régimen: } \frac{0,30}{2,15} \text{ kW.h.}$$

Ahorro medio: 1,68 kW.h. por kilómetro de recorrido del coche.

C) *Energías consumidas en tracción por pasajero y trayecto medio, contando con un grado de utilización de 0,4 del pasaje.*

Con esta utilización viajarán $100 \times 0,40 = 40$ viajeros por coche.

En el trayecto medio por pasajero supuesto de seis kilómetros (seis estaciones más la de partida) el consumo por coche será:

Sin recuperación cinética:

$$6 \times 3,83 \times \frac{20 - 4,20}{20 \text{ Tn}} = 22,98 \times 0,79 = 18,15 \text{ kWh/coche}$$

y por viajero y trayecto:

$$\frac{18,15}{40} = 0,45 \text{ kW.h./v.}$$

Con recuperación cinética:

$$6 \times 2,15 \times \frac{21 - 4,20}{21 \text{ Tn}} = 12,90 \times 0,80 = 10,32 \text{ kWh/coche}$$

y por viajero y trayecto:

$$\frac{10,32}{40} = 0,26 \text{ kW.h./v.}$$

D) *Velocidades comerciales y capacidad de transporte por línea.*

Tiempos de recorrido entre cada dos estaciones (a un kilómetro):

$$\begin{aligned} \text{Aceleración y frenado: } & 2 \times 25,47 = 50,94 \text{ seg.} \\ \text{En marcha de régimen: } & 7,25 \text{ seg.} \\ \text{En parada de estación: } & 15,00 \text{ seg.} \\ & \underline{73,19 \text{ seg.}} \end{aligned}$$

$$\text{Velocidad comercial: } \frac{3.600}{73,19} = 49,21 \text{ Km/h.}$$

Por lo tanto, los 20 Km de la línea los recorrerá en $20 \times 73,19$ seg. = 24,40 minutos.

DISPOSITIVO REGULADOR DE VELOCIDAD Y RECUPERADOR DE ENERGIA

Si, para redondear, admitimos una pérdida de tiempo en la maniobra final y arranque de 5.20 minutos, resultará que cada tren podrá realizar un recorrido de ida o vuelta cada media hora $\langle \rangle$ 38 recorridos (de ida o vuelta) en jornada de 19 horas; con un recorrido diario del vehículo de $38 \times 20 = 760$ Km, habiendo transportado en ellos, con una ocupación media del 40 por 100 de las plazas, al día: $760 \times 0,4 \times 100 = 30.400$ viajeros por kilómetro y teniendo en cuenta que el recorrido medio por pasajero es de seis kilómetros, habrá transportado al día 5.066,7 pasajeros.

E) *Parque móvil y líneas exigidas para servir un millón de pasajeros por día.*

Para transportar un millón de pasajeros por día

$$\frac{1.000.000}{5.067,7} = 198$$
 se precisaría un parque útil de 198 coches y si el grado de disponibilidad es del 75 por 100 se requerirá un parque total de 263 coches (contando con 25 por 100 en reparación y revisión).

La capacidad horaria máxima de transporte por línea, en hora punta, contando con el grado de ocupación media del 80 por 100 en todo su recorrido y una cadencia de un tren de cuatro unidades cada cinco minutos, será:

$$12 \text{ trenes/hora } \langle \rangle 48 \text{ coches/hora (*)}$$

Cada coche llevará $100 \times 0,80 = 80$ pasajeros,

$$\frac{20}{6} = 3,3 \text{ veces;}$$
 que se renovarán en el recorrido 3,3 veces;
 $48 \times 80 \times 3,3 = 12.800$ pasajeros hora punta por línea.

Con el grado medio de ocupación de plazas de 0,4, supuesto al día, cada línea transportará: 6.400 pasajeros/hora y en 19 horas = 121.600 pasajeros. Se necesitará, por tanto, disponer de

$$\frac{121.600}{30.400} = 4,11 \text{ líneas, de doble vía, similares}$$
 para servir el millón de viajeros por día, supuesto.

F) *Consumos diarios de energía para el millón de pasajeros/día.*

En el apartado C se ha estimado que con una ocupación media del 40 por 100 de plazas cada viajero, en el trayecto medio consumiría:

(*) Susceptible de duplicarse aumentando la frecuencia de paso de trenes, que puede llegar a ser de 2,5 min. (todavía superior al tiempo invertido en cada recorrido medio entre estaciones).

Sin recuperación cinética:

0,45 kWh/viajero

Para el millón de viajeros/día: 450.000 kWh/día.

Con recuperación del 70 por 100 de la energía cinética en frenados:

0,26 kWh/viajero

Para el millón de viajeros/día: 260.000 kWh/día.

Diferencia = 190.000 kWh/día.

Cabe admitir que el consumo anual equivalga a 300 veces el de un día hábil normal; por lo tanto, serían susceptibles ahorros de: 57 millones de kWh por año, y de unos ahorros de potencia evaluables en 241,11 kW por coche en arranques, y negativos de 7,05 kW (mayor consumo por más peso) en marcha normal.

G) *Demanda global de potencia del sistema.*

Teniendo en cuenta el mayor consumo en marcha de régimen 0,30 frente a 0,28 kW/h en 7,25 segundos y las paradas, tendremos que el ahorro efectivo de potencia media demandada en el sistema se podrá estimar en la siguiente forma:

		Potencia por coche	
		Con recup. de energía cinética	Sin recup. de energía cinética
En parada			
de estación	15,00 seg.	—	—
En arranques	25,47 seg.	241,1 kW	502,18 kW
En frenados	25,47 seg.	—	—
En marcha			
de régimen	7,25 seg.	148,16 kW	141,11 kW
	73,19 seg.		

En el caso de una supuesta escalonada y perfecta distribución de cargas a lo largo del tiempo en los distintos trenes (para no provocar resonancias por suma de las máximas potencias demandadas), las potencias medias continuas, por coche, exigidas serían:

Con recuperación energética:

$$\begin{aligned}
 & \frac{241,11 \times 25,47 + 148,16 \times 7,25}{73,19} = \\
 & \frac{6.141,07 + 1.074,16}{73,19} = 98,58 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

DISPOSITIVO REGULADOR DE VELOCIDAD Y RECUPERADOR DE ENERGIA

Sin recuperación energética:

$$\frac{12.790,52 + 1.023,05}{73,19} = 188,74 \text{ kW}$$

Cantidades que multiplicadas por 198 coches circulantes en la hora punta diurna, da totales de:

$$98,58 \times 198 = 19.518,84 \text{ kW}$$
$$188,74 \times 198 = 37.370,52 \text{ kW}$$

Diferencia = 17.950,26 kW de ahorro con recuperación

Si por el contrario, no se produjera el supuesto escalonamiento perfecto en las potencias demandadas por los distintos trenes y si la coincidencia de arranques, por improbable que fuera, las potencias requeridas del sistema, serán:

Con recuperación cinética:

$$241,11 \times 198 = 47.739,78 \text{ kW}$$

Sin recuperación cinética:

$$502,18 \times 198 = 99.431,64 \text{ kW}$$

Con un ahorro de: 51.692 kW.

Tales valores extremos limitan el campo de variación de los ahorros de potencia según el grado de coincidencia en las maniobras en los distintos trenes. En rigor el problema estadístico, en función de la probabilidad de suceder, tendría solución matemática correcta sobre la hipótesis simplista de partida, de equidistancia de estaciones, pero se haría más complejo de calcular sobre un caso real, en que tal equidistancia entre estaciones no se produzca, ni se den condiciones de explotación más racionales que las leyes de azar.

A nuestros efectos estimaremos como valor prudente del ahorro en la potencia total demandada, la cifra de:

$$17.950 + \frac{2}{3} (51.691,86 - 17.950) = 40.445 \text{ kW}$$

H) *Valores de los ahorros de potencia y energía en el sistema.*

Si se valora esta potencia, a razón de 40.000 pesetas por kilovatio podríamos atribuir al sistema un ahorro en concepto de gasto de primera instalación en potencia de 1.618 millones de pesetas; aparte del costo anual de la energía ahorrada (en el supuesto de un sistema autogenerador de la energía consumida, caso comparable al de trac-

ción con motores o turbinas autónomos quemando hidrocarburos).

Para tener en cuenta el ahorro de energía, debía contar como gasto adicional sólo la capitalización del consumo del combustible, y a tal respecto nos parece prudencial contar con una peseta por kilovatio-hora, o sea, 57 millones por año; renta que capitalizada al 10 por 100 nos daría un capital equivalente de 570 millones de pesetas.

Sumadas ambas cantidades de 1.618 y 570 millones de pesetas obtenemos la cifra de 2.188 millones de pesetas, que representaría el ahorro equivalente en gastos de primera instalación de un sistema de transporte autoestablecido de energía dotado de recuperación cinética.

Como es natural nos hemos venido refiriendo a un sistema ideal en que se dan unas características de funcionamiento imaginarias, que en general no encajarán con las de ninguno de los sistemas actualmente en explotación. Cada caso particular exigirá un estudio económico concreto en función de sus condiciones reales de explotación, que nos permitirá comprobar el grado de economía obtenible con una eventual transformación del sistema matriz según estas ideas.

Por lo pronto nos parece interesante la introducción del dispositivo economizador en los nuevos coches del metropolitano y trenes de cercanías que se vayan construyendo para reponer los obsoletos, sin variar los sistemas de alimentación eléctrica a c/c o a base de hidrocarburos de que dispongan las líneas en explotación.

En cambio, consideramos lógico y prometedor introducir plenamente nuestra nueva concepción, aquí descrita, en las nuevas líneas ferroviarias de cercanías y en las líneas del metropolitano que en el futuro se construyan.

También parece lógico utilizar economizadores cinéticos en los autobuses y vehículos públicos con recorridos preferentemente urbanos, de nueva construcción, por las ventajas —de toda índole— que se enumeran en el resumen final de este escrito.

Aunque parezca paradójico, el dispositivo regulador resultaría especialmente idóneo en vehículos eléctricos accionados por baterías, a los que conferiría potencias y reprises suplementarios, incluso reduciendo la potencia de los motores de que estaban dotados en sus concepciones primitivas. Se daría en ellos entonces una duplicidad de sistemas acumuladores energéticos (uno estático y otro cinemático) con posibilidades de transferencia, sin complicar en absoluto el equipo.

DISPOSITIVO REGULADOR DE VELOCIDAD Y RECUPERADOR DE ENERGIA

Asimismo, creemos que serían estos equipos muy idóneos en automóviles dotados de motores Diesel permitiendo agilizarlos, reduciendo incluso también la potencia original de sus motores, sin menoscabo de sus prestaciones, y con rendimientos más elevados al circular por ciudades.

Otras ventajas, no mencionadas hasta ahora derivadas de la utilización de este dispositivo serían:

1.º Ahorros en el mantenimiento de los dispositivos de frenado de los vehículos, por reducción de desgaste de los ferodos.

2.º Ahorros en neumáticos por menor erosión de su pastilla en procesos de frenado.

3.º Aumento de seguridad de circulación en pavimentos deslizantes.

4.º Aumento del confort por efectos estabilizadores giroscópicos (en cambio no son de temer dificultades notables de gobierno del vehículo por este mismo motivo, probadas ya en antiguos giro-buses con volantes mucho mayores que circularon a satisfacción en Suiza).

5.º Reducción de gastos en el mantenimiento de la vía, por reducción de esfuerzos transmitidos a ésta por los vehículos durante los frenados. En igualdad de gastos de mantenimiento permitiría mayores pesos por eje del vehículo, si está dotado de este dispositivo.

- l) *Comprobación de las velocidades características de funcionamiento del volante y del vehículo.*

En el apartado 4-l.d. se admitía que el volante de inercia de cada coche automotor, tendría un peso de 500 Kg (1.000 Kg todo el equipo añadido sobre el convencional) y el radio de giro eficaz sería de 0,60 m.

Supongamos que:

a) Sea W_{max} : la velocidad angular máxima de giro que el volante precisa para acumular 1,60 kWh de energía útil. Lo que equivale a 586.957 Kgm.

b) Sea $W_{nominal}$: la velocidad nominal de giro del motor.

En nuestro caso $W_{nominal} = 750$ r.p.m. = 12,5 r.p.s.

c) Sea W_{min} : la velocidad angular mínima del eje de ruedas del vehículo para la que es posible recuperar la energía cinética del coche. (Sistema ruedas-volante embragado por el eje multiplicador).

d) Sean $\frac{r_{12}}{r_{13}} = \frac{r_6}{r_4} = 5$ las relaciones de radios eficaces de las cuatro ruedas dentadas.

Por lo tanto, el factor multiplicador de la velocidad angular de giro de ejes de rueda a eje de volante será de $5 \times 5 = 25$.

e) La energía útil almacenada en el volante E tiene por expresión:

$$E = \frac{1}{2} M (V_{max}^2 - V_{nominal}^2) = 586.957 \text{ Kg.m}$$

en la que:

$$V_{max} = 2 \cdot \pi \cdot 0,6 W_{max} = 3,77 W_{max}$$

$$V_{nom} = 3,77 \times W_{nominal} = 3,77 \times 12,5 = 47,124 \text{ m/seg.}$$

f) Diámetros de las ruedas de los coches:

$$D = 1 \text{ m.}$$

De las fórmulas anteriores se obtiene el valor:

$$W_{max} = 42,16 \text{ r.p.s.} < > 2.529,35 \text{ r.p.m.}$$

La velocidad angular resultante para el eje de ruedas del vehículo será:

$$\frac{W_{max}}{25} = \frac{42,16}{25} = 1,69 \text{ r.p.s.}$$

que corresponde a una velocidad lineal de avance del coche, en el límite de posibilidad de recuperación de su energía cinética, de:

$$1,69 \cdot \pi \cdot D = 5,30 \text{ m/s} = 19,080 \text{ Km/hora}$$

Por debajo de esta velocidad para detener el vehículo habrá que desembragar el árbol multiplicador y operar con frenos de disco o similares.

La energía remanente, no recuperable, será, pues:

$$\frac{19,080^2}{110,000^2} = 0,03 \text{ de la total de que estaba almacenado el vehículo cuando circulaba a 110 Km/hora.}$$

Es decir: $0,03 \times 2,29 = 0,0687$ kWh de energía que se disipará en forma de calor de fricción en las zapatas de frenos.

J) *Grado de fiabilidad de las estimaciones económicas precedentes.*

Apriorísticamente, sin demostración alguna, habíamos admitido que con el sistema mecánico descrito era posible recuperar hasta el 70 por 100 de

DISPOSITIVO REGULADOR DE VELOCIDAD Y RECUPERADOR DE ENERGIA

EMBRAGUE MAGNETICO

VARIANTE E

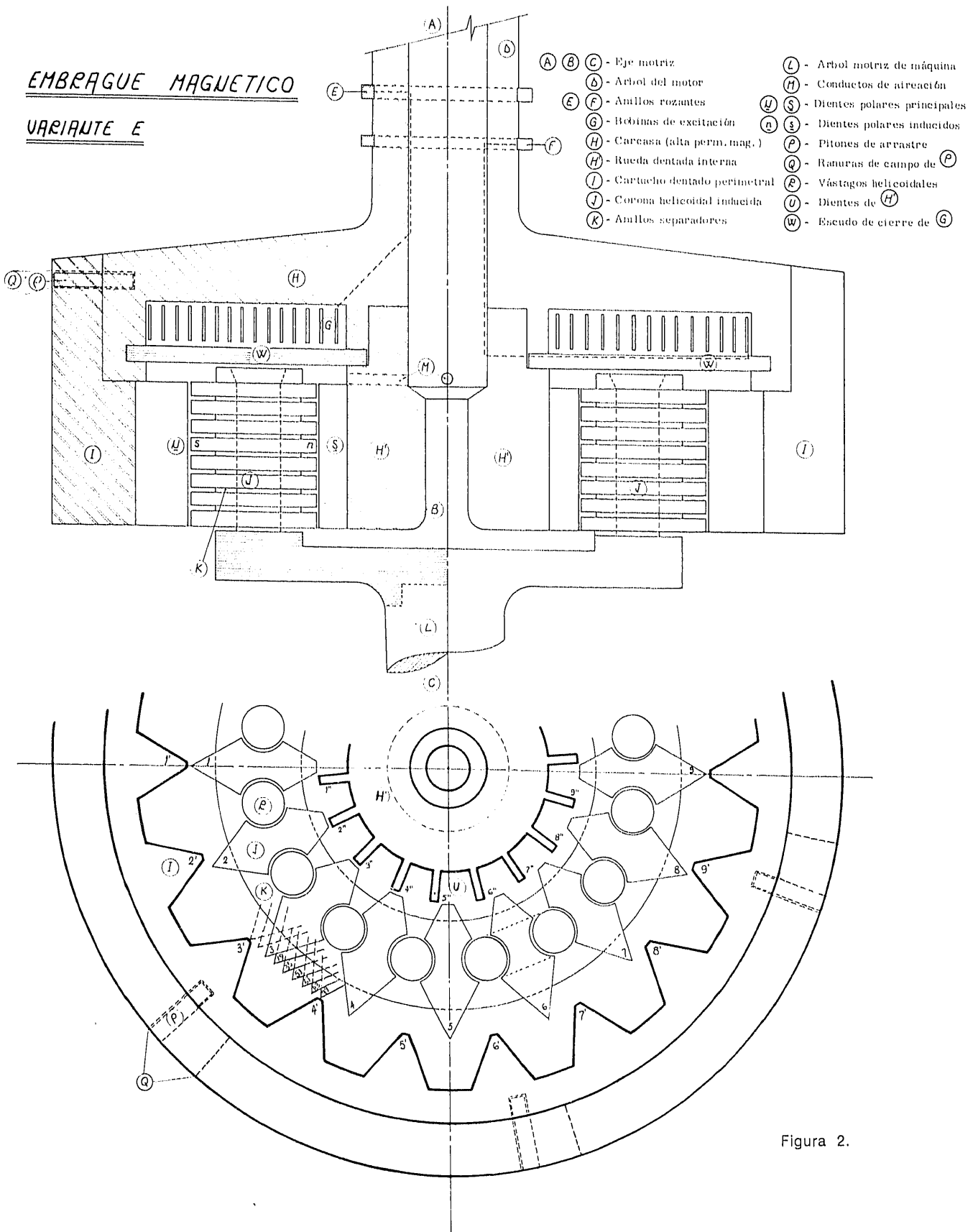
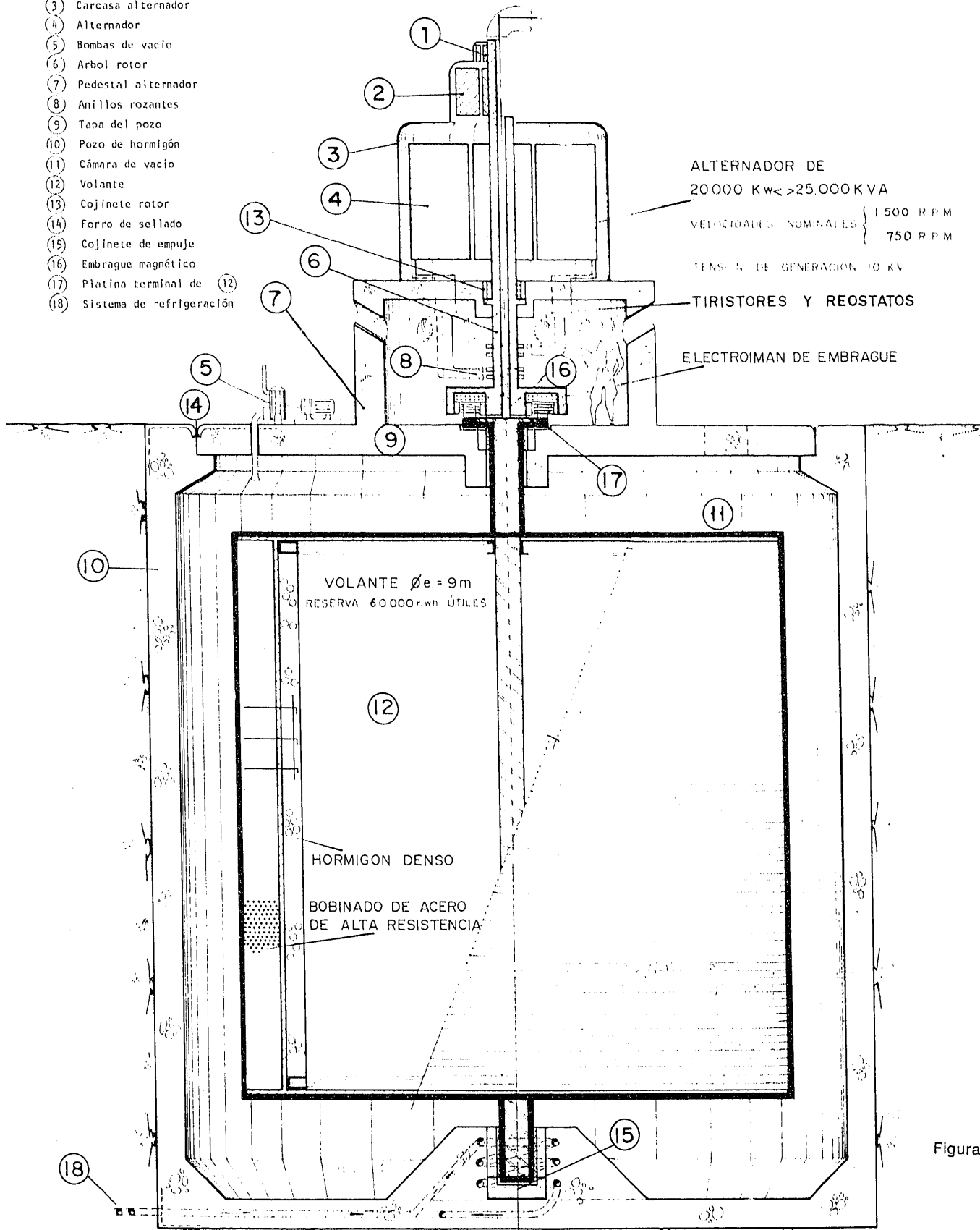


Figura 2.

DISPOSITIVO REGULADOR DE VELOCIDAD Y RECUPERADOR DE ENERGIA

- ① Motor de lanzamiento (eventual)
- ② Excitatriz (eventual)
- ③ Carcasa alternador
- ④ Alternador
- ⑤ Bombas de vacío
- ⑥ Arbol rotor
- ⑦ Pedestal alternador
- ⑧ Anillos rozantes
- ⑨ Tapa del pozo
- ⑩ Pozo de hormigón
- ⑪ Cámara de vacío
- ⑫ Volante
- ⑬ Cojinete rotor
- ⑭ Forro de sellado
- ⑮ Cojinete de empuje
- ⑯ Embrague magnético
- ⑰ Platina terminal de
- ⑱ Sistema de refrigeración



Figura

la energía cinética de frenado del vehículo. Para alcanzar tan elevado rendimiento global se precisará disponer de embragues de alto rendimiento, de tipo distinto de los de fricción convencionales, cuyas pérdidas por deslizamiento relativo son muy elevadas.

En la figura 2 se representa un tipo de embrague magnético, concebido y patentado por quien suscribe esta nota, con el que se esperan obtener resultados superiores a los aquí admitidos. Un prototipo de tales dispositivos va a ser construido y ensayado en breve contando con la ayuda del CDTI. Tanteos preliminares nos permiten esperar rendimientos superiores al 95 por 100, para potencias del mismo orden que las exigidas en el coche considerado.

5. ALCANCE Y PRECEDENTES DEL PRESENTE INFORME

El presente informe tiene por objeto la exposición de un ejemplo práctico de aplicación de algunas ideas del campo de la energética, que vengo desarrollando últimamente, cuyo precedente más inmediato fue la concepción de un dispositivo convertidor de energía de valle en energía de punta, que confiamos supla ventajosamente a las centrales hidroeléctricas reversibles en algunas de sus más características funciones (ver figura 3).

Elementos básicos de tal dispositivo, que han exigido estudios particulares, eran:

Un sistema motor-generador reversible funcionando a dos velocidades nominales de sincronismo.

Un gran volante de inercia, de concepción especial, dadas sus extraordinarias dimensiones y enormes esfuerzos que ha de soportar.

Un sistema de embrague magnético de gran potencia y alto rendimiento, idéntico al propugnado en esta aplicación (ver figura 2).

Estos tres elementos han sido objeto de estudios conceptuales que se han plasmado en diversas patentes de invención.

Para enfatizar la importancia del embrague magnético de alto rendimiento y mostrar alguna de sus más idóneas aplicaciones hemos redactado este escrito, que no pretende ser exhaustivo de las posibilidades que tal dispositivo ofrece.

La asociación del volante y el embrague cita-

dos constituyen además un elemento multiplicador de potencia que permitirá accionar intermitentemente grandes máquinas, contando con una alimentación más continuada de energía con potencia limitada. De esta manera podrán construirse y operarse máquinas de potencia extraordinaria, casi explosiva, con suministros de energía de débil potencia, sin más que disponer del sistema volante-embrague y breves y robustos elementos de transmisión mecánica.

6. CONCLUSIONES

La utilización en vehículos de transporte urbano de reguladores de velocidad como el descrito van a permitir:

- a) Ahorrar energía.
- b) Ahorrar potencia, tanto en motores autónomos como en los sistemas eléctricos complejos cuando se trate de sistemas electrificados.
- c) Aumentar, a bajo costo, las aceleraciones de los vehículos.
- d) Aumentar, a bajo costo, las velocidades medias comerciales de los vehículos y con ello sus rendimientos efectivos.
- e) Reducir la contaminación ambiental (gases, ruidos y calor) respecto a la que producirían vehículos con análogas prestaciones de concepción más convencional.
- f) Simplificar la mecánica y el manejo de los vehículos.

A este último respecto hay que considerar que las maniobras podrán realizarse utilizando una palanca de tres posiciones para situaciones de paro, marcha adelante y marcha atrás y dos pedales, uno para la aceleración y otro de frenado, aparte del volante de conducción que se eliminaría en los sistemas guiados circulantes por vías. En este último caso se podrían concentrar los mandos en un volante giratorio con una zona muerta central para parada, aceleración por giro del volante en un sentido y frenado por giro contrario con arrastre final del freno de disco tras el desembrague del árbol multiplicador.

Con ello cabrá automatizar totalmente la conducción de los trenes que podrían mandarse por un computador electrónico que reduzca además, convenientemente, los efectos de punta: coordinando las secuencias de arranque de los distintos trenes circulantes en el sistema.