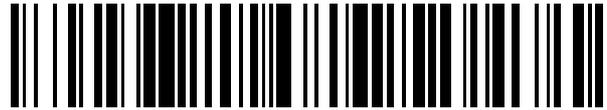


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 692 044**

51 Int. Cl.:

**B60L 11/16** (2006.01)

**B60T 1/10** (2006.01)

**B61C 9/50** (2006.01)

**B61C 17/06** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **01.04.2016** **E 16723159 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **29.08.2018** **EP 3277535**

54 Título: **Sistema de frenado ferroviario regenerativo**

30 Prioridad:

**02.04.2015 ZA 201502292**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

**29.11.2018**

73 Titular/es:

**TRANSNET SOC LIMITED (100.0%)**  
**160 Lynette Street, Kilner Park**  
**0186 Pretoria, ZA**

72 Inventor/es:

**PYPER, ANDREAS**

74 Agente/Representante:

**ROEB DÍAZ-ÁLVAREZ, María**

ES 2 692 044 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

**DESCRIPCIÓN**

Sistema de frenado ferroviario regenerativo

**5 Antecedentes de la invención**

La presente invención se refiere a un sistema de frenado ferroviario regenerativo. En particular, pero no exclusivamente, la invención se refiere a un sistema de frenado regenerativo mecánico distribuido para vagones ferroviarios.

10 Un tren de mercancías habitual tiene una serie de locomotoras que sirven como motor primario y material rodante en forma de coches o vagones de mercancías. El número de vagones en un tren varía significativamente y algunos podrían incluir más de 300. Cada vagón tiene una serie de bogies que incluyen ruedas que se desplazan sobre el raíl. Las ruedas de vagón habituales no están motorizadas y no proporcionan un esfuerzo de tracción al tren. Sin embargo, contienen sistemas de freno para mejorar el frenado general del tren. Es bien sabido que la energía generada durante las operaciones de frenado tradicionales se disipa en forma de calor y ruido y que es deseable capturar esta energía para su reutilización. Esto daría como resultado un ahorro de energía significativo y también reduciría la tensión en ciertos componentes de un tren. En una gran red ferroviaria, el ahorro de energía proporcionado por un sistema de frenado regenerativo eficiente se traduciría en un ahorro financiero sustancial. Las ventajas de los sistemas de frenado regenerativo son bien conocidas y ya se ha propuesto una gama de soluciones diferentes en una serie de aplicaciones diferentes.

25 Un tipo conocido de sistema de frenado regenerativo convierte la energía mecánica en energía eléctrica para su almacenamiento en una unidad de almacenamiento. Cuando es necesario, el sistema de frenado convierte la energía eléctrica de nuevo en energía mecánica, habitualmente para aplicarse en los ejes impulsores del bogie en el que está instalado el sistema de frenado. Un ejemplo de dicho sistema de frenado regenerativo se describe en la memoria descriptiva del documento US 8.789.472. El sistema descrito en esta memoria descriptiva de la técnica anterior comprende un sistema de almacenamiento de energía (ESS) para recibir, almacenar y suministrar energía a petición, un motor/generador que convierte la energía eléctrica en energía mecánica y viceversa, y un convertidor eléctrico que convierte la energía eléctrica suministrada o recibida por el ESS en tensión y corriente adaptadas para el suministro o recuperación de la energía del motor/generador. Una desventaja de este sistema conocido es que requiere una conversión continua de energía entre la forma eléctrica y mecánica y viceversa. El resultado de esto es que el sistema es relativamente complejo y requiere la instalación de componentes eléctricamente operables en cada bogie en el que está instalado el sistema de frenado. Esto no solo aumenta los gastos de capital de instalar dicho sistema en una red ferroviaria sino que también aumenta los costes de mantenimiento y funcionamiento.

40 Otro tipo de sistema de gestión de energía regenerativa que se ha propuesto almacena energía en forma de fluido hidráulico presurizado. Tal sistema se describe en la memoria descriptiva del documento WO 2004/026657. Este sistema incluye un medio de acumulación de energía que puede hacerse funcionar para almacenar y liberar energía a través de la recepción y la liberación controladas de fluido hidráulico presurizado, una bomba/motor de fluido de desplazamiento positivo y un depósito hidráulico de baja presión. El conjunto de bomba/motor de desplazamiento positivo tiene un eje impulsor para su conexión a al menos una de las ruedas del bogie. En un modo de frenado, el conjunto de bomba/motor retarda la rueda asociada bombeando fluido hidráulico al medio de acumulación mientras que en un modo de accionamiento suministra potencia suplementaria usando fluido hidráulico procedente del medio de acumulación. En este sistema, solo el conjunto de bomba/motor se instala en el bogie del vagón ferroviario mientras que el resto del equipo, tal como el acumulador de energía, se instala en el vagón ferroviario que lleva el bogie en el que se instala el conjunto de bomba/motor. Esta instalación es de nuevo compleja y requiere que una red de componentes hidráulicos se instale en el vagón ferroviario. El sistema también es costoso de instalar y tiene unos costes de funcionamiento y mantenimiento significativos.

50 En la memoria descriptiva del documento GB 2 425 290 se ha propuesto un sistema mecánico simplificado y se ha descrito un ejemplo de un sistema de este tipo. Esta memoria descriptiva de la técnica anterior describe un sistema en el que un volante de inercia y un motor de combustión interna o un motor eléctrico con una fuente de alimentación, se instalan en un bogie de un vagón ferroviario. También se incluyen una caja reductora, una serie de convertidores hidrostáticos, embragues y un árbol de salida acoplado a los ejes del bogie para transferir la potencia del motor al volante de inercia y finalmente a las ruedas del vagón. Este sistema propuesto es simplemente un sistema de almacenamiento de energía mecánica para almacenar la energía proporcionada por el motor para su uso posterior. Este sistema no permite el frenado regenerativo y el volante de inercia simplemente se acciona por el motor instalado en el bogie.

60 Otro dispositivo de frenado regenerativo se conoce a partir del documento US4 319 655. Este documento describe un dispositivo que usa un rodillo elastomérico, que durante el uso se somete a tensión torsional para acumular energía desde el tren motriz del vehículo. El rodillo se somete a tensión cuando se aplican un embrague de entrada y un freno de salida, y se relaja para suministrar la energía acumulada al tren motriz cuando se aplican un embrague de salida y un freno de entrada. Un objeto de la presente invención es aliviar al menos algunos de los problemas experimentados con los sistemas de gestión de energía regenerativa existentes.

Otro objeto de la presente invención es proporcionar un sistema de frenado regenerativo que será una alternativa útil a los sistemas existentes.

### Sumario de la invención

5 De acuerdo con un primer aspecto de la invención, se proporciona un sistema de frenado regenerativo para su instalación en un bogie de un vehículo ferroviario, incluyendo el sistema regenerativo:

10 un sistema de almacenamiento de energía para almacenar energía en forma mecánica o cinética;  
un sistema de transmisión que puede funcionar selectivamente entre diferentes modos, incluyendo un modo de frenado en el que se transmite energía mecánica o cinética desde un eje del bogie al sistema de almacenamiento de energía y un modo de accionamiento en el que se transmite energía mecánica o cinética del sistema de almacenamiento de energía al eje del bogie; y  
15 una unidad de control que, durante el uso, está en comunicación con un motor primario del tren y el sistema de transmisión con el fin de recibir señales de control del motor primario y hacer funcionar automáticamente el modo del sistema de transmisión en respuesta a las señales de control.

El vehículo ferroviario puede ser un vehículo no motorizado, preferentemente un vagón ferroviario.

20 El sistema de transmisión puede tener la forma de una transmisión continuamente variable (CVT).

El sistema de frenado regenerativo puede incluir un enlace de transmisión a eje para transmitir energía mecánica o cinética entre el eje del bogie y el sistema de transmisión. El enlace de transmisión a eje puede tener la forma de una cadena de transmisión, una disposición de correa y polea o un conjunto de engranajes. En una realización del sistema, el enlace de transmisión a eje puede tener la forma de un conjunto de engranajes, uno de los cuales se fija al eje del bogie de manera que rote en armonía con el eje y el otro se transporta en un primer árbol de entrada/salida del sistema de transmisión.

El sistema de frenado regenerativo puede incluir un embrague localizado en el primer árbol de entrada/salida del sistema de transmisión para acoplar el sistema de transmisión y el conjunto de engranajes de transmisión cuando se acopla el embrague y desacoplar el sistema de transmisión del conjunto de engranajes de transmisión cuando se desacopla el embrague.

El sistema de almacenamiento de energía puede incluir un volante de inercia.

En una realización del sistema, el volante de inercia está montado, durante el uso, en el mismo eje del bogie que el sistema de transmisión, de tal manera que el eje de rotación del volante de inercia es coaxial con el eje del bogie. Preferentemente, el volante de inercia se monta en el eje del bogie por medio de un conjunto de rodamiento, de manera que se permite que rote independientemente del eje del bogie. En una realización alternativa del sistema de frenado regenerativo, el volante de inercia puede, durante el uso, estar montado en un árbol que es paralelo al eje del bogie.

El sistema de frenado regenerativo puede incluir un enlace de transmisión a sistema de almacenamiento de energía. El enlace de transmisión a sistema de almacenamiento de energía puede tener la forma de una cadena de transmisión, una disposición de correa y polea o un conjunto de engranajes. En una realización del sistema, el enlace de transmisión a sistema de almacenamiento de energía puede tener la forma de un conjunto de engranajes, uno de los cuales se lleva por el conjunto de rodamiento y el otro se lleva en un segundo árbol de entrada/salida del sistema de transmisión.

El sistema de frenado regenerativo puede incluir además un embrague localizado en el segundo árbol de entrada/salida del sistema de transmisión para acoplar el sistema de transmisión y el enlace de transmisión a sistema de almacenamiento de energía cuando se acopla el embrague y desacoplar el sistema de transmisión del enlace de transmisión a sistema de almacenamiento de energía cuando se acopla el embrague.

De acuerdo con un segundo aspecto de la invención, se proporciona un bogie ferroviario que incluye un sistema de frenado regenerativo de acuerdo con el primer aspecto de la invención instalado en cada eje del bogie, en el que los sistemas de frenado pueden hacerse funcionar independientemente uno de otro.

De acuerdo con un tercer aspecto de la invención, se proporciona un sistema de gestión de energía regenerativa para un tren que tiene un motor primario y una serie de vagones ferroviarios, incluyendo el sistema de gestión de energía una serie de sistemas de frenado regenerativo de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 16 instalados en cada uno de los vagones ferroviarios, en el que las unidades de control de los sistemas de frenado regenerativo están en comunicación independiente con el motor primario.

65

De acuerdo con un cuarto aspecto de la invención, se proporciona un método de funcionamiento de un sistema de frenado regenerativo que incluye un sistema de almacenamiento de energía para almacenar energía en forma mecánica o cinética, un sistema de transmisión y una unidad de control para controlar el sistema de transmisión, incluyendo el método:

5 recibir una señal de control;  
conmutar entre diferentes modos de funcionamiento en respuesta a la señal de control, en el que los diferentes modos incluyen los siguientes:

- 10 un modo de aislamiento, en el que el sistema de transmisión se desacopla de un eje de un bogie y del sistema de almacenamiento de energía;
- un modo de autodescarga, en el que el sistema de almacenamiento de energía se desacopla del sistema de transmisión y la energía se disipa del sistema de almacenamiento de energía;
- 15 un modo de frenado, en el que el sistema de almacenamiento de energía se acopla con el sistema de transmisión de tal manera que se aplica una fuerza a las ruedas del bogie que actúa en una dirección frenando las ruedas de bogie, cargando de este modo el sistema de almacenamiento de energía;
- un modo inactivo, en el que se carga el sistema de almacenamiento de energía pero no se carga adicionalmente ni se aplica un esfuerzo de tracción al eje del bogie; y
- 20 un modo de accionamiento, en el que el sistema de almacenamiento de energía se acopla con el sistema de transmisión de tal manera que se aplica una fuerza a las ruedas del bogie que actúa en una dirección accionando las ruedas de bogie.

El modo de aislamiento puede activarse por una señal que detecta fallos o defectos en cualquier componente del sistema.

25 El modo de autodescarga puede activarse por una señal que detecta un fallo de un componente del sistema o por una señal de que los componentes del sistema necesitan cerrarse al final de un viaje.

En el modo de autodescarga, la energía se disipa preferentemente desde el sistema de almacenamiento de energía aplicando frenos al sistema de almacenamiento de energía para disipar la energía en forma de calor y ruido.

30 El modo de autodescarga puede desactivarse por una señal de sensor de velocidad que indica que el sistema de almacenamiento de energía se ha descargado suficientemente.

35 El modo de frenado puede activarse por una señal de la locomotora principal durante el frenado.

El método puede incluir mantener el par que se aplica al eje del bogie durante el modo de frenado por el sistema de frenado regenerativo dentro de un intervalo que garantice que no haya deslizamiento entre las ruedas del bogie y el raíl.

40 En una realización, el método puede incluir monitorizar el deslizamiento comparando la velocidad de rotación de la rueda o del eje con la velocidad de traslación del vehículo. Esta realización puede incluir reducir el par aplicado por el sistema de frenado regenerativo durante el modo de frenado si la velocidad de rotación del eje es mayor que la velocidad de traslación del vehículo. El modo de frenado puede desactivarse por una señal de sensor de velocidad que indica que el sistema de almacenamiento de energía está completamente cargado.

En una realización alternativa, el método puede incluir medir las fuerzas de acoplador del vagón ferroviario y desactivar el modo de frenado cuando la señal de fuerza de acoplador esté dentro de un intervalo predeterminado.

50 El modo inactivo puede activarse por una señal de que el tren avanza por inercia. Como alternativa, el modo inactivo se activa cuando hay una señal de que las fuerzas de acoplador están dentro de un intervalo predeterminado. El modo de accionamiento puede activarse por una señal de que se requiere potencia. Preferentemente, la señal que indica que se requiere potencia se recibe de la locomotora principal.

55 El método puede incluir, además, mantener el par que se aplica al eje del bogie durante el modo de accionamiento por el sistema de frenado regenerativo dentro de un intervalo que garantice que no haya deslizamiento entre las ruedas del bogie y el raíl. En una realización, el método incluye monitorizar el deslizamiento comparando la velocidad de traslación del vehículo con la velocidad determinada a partir de la velocidad del eje del bogie.

60 El método también puede incluir reducir el par que se aplica por el sistema de frenado regenerativo durante el modo de accionamiento si la velocidad de rotación del eje es mayor que la velocidad de traslación del vehículo.

El modo de accionamiento puede desactivarse por una señal de sensor de velocidad que indica que el sistema de almacenamiento de energía está completamente descargado.

65

En una realización alternativa, el método puede incluir medir las fuerzas de acoplador del vagón ferroviario y desactivar el modo de accionamiento cuando la señal de fuerza de acoplador esté dentro de un intervalo predeterminado.

5 **Breve descripción de los dibujos**

A continuación, la invención se describirá con más detalle, solo a modo de ejemplo, con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

- 10 **Figura 1** muestra una ilustración esquemática de una primera realización de un sistema de frenado regenerativo de acuerdo con la invención instalado en un eje de un bogie ferroviario;
- 15 **Figura 2** muestra el diseño de un volante de inercia de un sistema de almacenamiento de energía del sistema de frenado de la figura 1, mostrándose una vista en perspectiva en la figura 2(a) y una vista lateral en sección transversal en la figura 2(b); y
- 20 **Figura 3** ilustra la posición del sistema de frenado regenerativo de la figura 1 en un bogie ferroviario, mostrándose una vista en perspectiva en la figura 3(a) y una vista desde arriba parcial en la figura 3(b);
- 25 **Figura 4** muestra una ilustración esquemática de una segunda realización de un sistema de frenado regenerativo de acuerdo con la invención instalado en un eje de un bogie ferroviario;
- 30 **Figura 5** muestra una gráfica de la velocidad de rotación de un volante de inercia del sistema de la figura 1 trazada en función del tiempo, indicando de este modo cómo se caracteriza la disminución de la velocidad de rotación del volante de inercia y la ecuación cuadrática que puede usarse para estimar la velocidad de rotación en función del tiempo;
- 35 **Figura 6** muestra la eficiencia general del sistema de frenos en función del tiempo que la energía está almacenada en el sistema de almacenamiento de energía (ESS) del sistema de la figura 1;
- 40 **Figura 7** muestra una representación gráfica de un ahorro de energía simulado cuando se usa el sistema de la figura 1;
- 45 **Figura 8** muestra una representación gráfica de un estado de carga simulado del ESS de cada sistema de frenos individual de la figura 1;
- Figura 9** muestra una representación gráfica de una curva de potencia de un solo sistema de frenos de la figura 1;
- Figura 10** muestra una representación gráfica del par aplicado al eje durante las operaciones de motorización y frenado del sistema de la figura 1; y
- Figura 11** muestra una representación gráfica de la relación de transmisión requerida entre un volante de inercia del sistema de la figura 1 y el eje del bogie.

**Descripción de las realizaciones ilustradas**

50 Haciendo referencia a los dibujos, en los que números similares indican características similares, un ejemplo no limitante de una primera realización de un sistema de frenado regenerativo de acuerdo con la invención se indica, en general, por el número de referencia 10.

55 En la presente memoria descriptiva, el sistema de frenado regenerativo 10 se describirá como un sistema de frenado regenerativo ferroviario para su uso en un bogie de un vehículo ferroviario. La expresión “vehículo ferroviario” debe interpretarse en sentido amplio para incluir tanto vehículos motorizados, tales como un motor primario, como vehículos no motorizados, tales como material rodante en forma de coches o vagones de mercancías. Por lo tanto, debe entenderse que la invención no está limitada para su uso a ningún tipo específico de vehículo ferroviario. Sin embargo, se prevé que el sistema 10 podría ser especialmente útil, por ejemplo, en bogies de vagones de mercancías o coches de remolque no motorizados. En la presente memoria descriptiva, la expresión vagón ferroviario debe interpretarse en el sentido de un coche de remolque o un vagón de mercancías. El sistema 10 está diseñado de tal manera que puede instalarse en un solo eje de un bogie, permitiendo de este modo que cada eje lleve su propio sistema de frenado regenerativo independiente 10. Por lo tanto, debe quedar claro que el sistema de frenado regenerativo 10 es un sistema distribuido que se distribuye por todo el tren. Se prevé que los árboles de todos o la mayoría de los bogies del tren podrían tener un sistema de frenado regenerativo 10 instalado en el mismo

60

65 con el fin de maximizar el ahorro de energía. Debe entenderse que el efecto de la distribución de los sistemas de frenado 10 es que la capacidad total de almacenamiento de energía se almacena en forma de paquetes más

pequeños que se distribuyen por todo el tren en lugar de en una localización centralizada.

Haciendo referencia ahora en particular a la figura 1, que muestra una ilustración esquemática, se describirá el sistema de frenado regenerativo 10 con más detalle. En esta figura, una parte de un eje de un bogie ferroviario se indica por el número 100 y una rueda llevada en un extremo del eje se indica por el número 102. Aunque no se muestra en la figura 1, debe entenderse que una rueda similar está montada en el otro extremo del eje y se monta en el mismo de tal manera que las dos ruedas giren en armonía.

Se muestra el sistema de frenado regenerativo 10 instalado en el eje 100. A partir de esta representación esquemática puede verse que el sistema 10 incluye un sistema de almacenamiento de energía (ESS) para almacenar energía en forma mecánica o cinética. En la realización preferida del sistema 10, el sistema de almacenamiento de energía incluye un volante de inercia 12 que se monta en el eje 100 por medio de un conjunto de rodamiento 14. El conjunto de rodamiento 14 tiene dos rodamientos individuales 16.1 y 16.2 que están montados coaxialmente en el eje 100 y que están separados el uno del otro. Los dos rodamientos 16.1 y 16.2 soportan un árbol tubular 18 montado sobre los mismos. En la realización preferida del sistema 10, el volante de inercia 12 se monta en el árbol tubular 18 de tal manera que rotan en armonía. En otras palabras, el volante de inercia rota alrededor de su eje central, que también es su eje de rotación y que es coaxial con el eje central del eje 100, cuando el árbol tubular 18 rota y viceversa.

El sistema de frenado 10 incluye además un sistema de transmisión 20 que puede hacerse funcionar selectivamente entre diferentes modos en los que i) se acopla con el eje 100 del bogie, ii) se acopla con el sistema de almacenamiento de energía, en particular, el volante de inercia 12, iii) se acopla tanto al eje 100 como al sistema de almacenamiento de energía o iv) se desacopla completamente tanto del eje 100 como del sistema de almacenamiento de energía. Como resultado, el sistema de transmisión 20 puede hacerse funcionar selectivamente entre diferentes modos que incluyen un modo de frenado en el que se transmite energía mecánica o cinética desde el eje 100 del bogie al sistema de almacenamiento de energía, en particular al volante de inercia 12, y un modo de accionamiento en el que se transmite energía mecánica o cinética desde el sistema de almacenamiento de energía, en particular el volante de inercia 12, al eje 100 del bogie. A continuación se cuenta más sobre los diferentes modos de funcionamiento del sistema de transmisión 20.

Los expertos en la materia sabrán que el tamaño del volante de inercia 12 y la velocidad angular a la que opera determinan cuánta energía puede escogerse para el volante de inercia. A partir de resultados experimentales, se obtuvieron los parámetros mostrados en la tabla 1 para el sistema de almacenamiento de energía 12. Aunque la capacidad energética obtenida a través de la configuración experimental fue de aproximadamente 1,4 kWh, se prevé que podría estar en cualquier punto entre 1 y 3 kWh.

Capacidad energética (kWh)	1,3889
Tasa de carga máxima (kW)	28
Tasa de carga promedio (kW)	7,87
Tasa de descarga máxima (kW)	30
Tasa de motor promedio (kW)	7,56
Duración de ciclo de freno promedio (S)	298

**Tabla 1: parámetros del sistema de almacenamiento de energía**

Los parámetros anteriores se usaron para diseñar el volante de inercia y las especificaciones del volante de inercia resultantes se proporcionan a continuación en la tabla 2. El diseño del volante de inercia se ilustra en la figura 2.

Masa del volante de inercia	95
Velocidad de rotación máxima (rpm)	14 000
Velocidad de rotación mínima (rpm)	5000
Energía cinética máxima (kJ)	6000
Capacidad de retorno de energía (kJ)	5000

**Tabla 2: especificaciones del volante de inercia**

Basándose en los parámetros anteriores, se estima que el par máximo en el volante de inercia estará en la región de aproximadamente 90 N.m. a una aceleración angular máxima de aproximadamente 15,74 rad/s<sup>2</sup>.

Haciendo referencia ahora a la figura 1, el sistema de transmisión 20 incluye unos árboles de entrada/salida primero y segundo indicados por los números 22 y 24 respectivamente. Dependiendo del modo de funcionamiento del sistema de transmisión 20, cada árbol 22, 24 podría funcionar o como un árbol de entrada usado para transferir energía al sistema de transmisión o como un árbol de salida usado para transferir energía desde el sistema de transmisión. El árbol de entrada/salida 22 se usa para conectar el sistema de transmisión 20 al eje 100 del bogie por medio de un enlace de transmisión a eje 26. El enlace de transmisión a eje 26 se usa para transmitir energía mecánica o cinética entre el eje 100 del bogie y el sistema de transmisión 20 y podría adoptar la forma de cualquier medio de accionamiento mecánico. Se prevé que el medio de accionamiento podría ser una cadena de transmisión,

una disposición de correa y polea o un conjunto de engranajes. En la ilustración esquemática de la figura 1, el medio de accionamiento mecánico se ilustra como un conjunto de engranajes. En la realización ilustrada del sistema 10, uno de los engranajes 26.1 se fija al eje 100 del bogie de manera que rote en armonía con el eje mientras que el otro engranaje 26.2 se lleva en el primer árbol de entrada/salida 22 del sistema de transmisión 20. Debe entenderse que la rotación del eje 100 provoca la rotación del primer engranaje 26.1 que, a su vez, hace rotar el segundo engranaje 26.2 y, en consecuencia, el primer árbol de entrada/salida 22.

Un embrague 28 está localizado en el primer árbol de entrada/salida 22 entre el segundo engranaje 26.2 y el sistema de transmisión 20. Durante el uso, el embrague 28 puede hacerse funcionar para acoplar el sistema de transmisión 20 y el enlace de transmisión a eje 26, es decir, el conjunto de engranajes de transmisión 26 en la realización ilustrada, cuando el embrague está en su estado acoplado y desacoplar el sistema de transmisión 20 del enlace de transmisión a eje 26 cuando el embrague está en su estado desacoplado.

De manera similar al enlace de transmisión a eje 26, el sistema de frenado 10 también incluye un enlace de transmisión a almacenamiento de energía 30 que puede hacerse funcionar selectivamente para acoplar y desacoplar el sistema de transmisión 20 y el sistema de almacenamiento de energía. El enlace de transmisión a almacenamiento de energía 30 también se denomina enlace de transmisión a volante de inercia en vista del hecho de que el sistema de almacenamiento de energía de la realización de la figura 1 incluye un volante de inercia 12. Se prevé de nuevo que el enlace de transmisión a volante de inercia 30 podría adoptar la forma de cualquier medio de accionamiento mecánico, tal como una cadena de transmisión, una disposición de correa y polea o un conjunto de engranajes, por ejemplo. En la ilustración esquemática de la figura 1, el enlace de transmisión a volante de inercia 30 se ilustra como un conjunto de engranajes. Un primer engranaje 30.1 del conjunto de engranajes se monta en el árbol tubular 18 de tal manera que rota en armonía con el árbol tubular. El primer engranaje 30.1 se fijará habitualmente al árbol tubular 18. Un segundo engranaje 30.2 del conjunto de engranajes 30 se lleva, a su vez, en el segundo árbol de entrada/salida 24. Debe entenderse que la rotación del árbol tubular 18 provoca la rotación del primer engranaje 30.1 que, a su vez, hace rotar el segundo engranaje 30.2 y, en consecuencia, el segundo árbol de entrada/salida 24.

Un embrague 32 también está localizado en el segundo árbol de entrada/salida 24 entre el segundo engranaje 30.2 y el sistema de transmisión 20. Durante el uso, el embrague 32 puede hacerse funcionar para acoplar el sistema de transmisión 20 y el enlace de transmisión a almacenamiento de energía 30, que es, en esta primera realización de la invención, un conjunto de engranajes de volante de inercia 30, cuando el embrague está en su estado acoplado y para desacoplar el sistema de transmisión 20 del enlace de transmisión a almacenamiento de energía 30 cuando el embrague está en su estado desacoplado.

Para controlar la transferencia de energía a través del sistema de transmisión 20, es decir, para controlar el funcionamiento de los embragues 28 y 32, el sistema de frenado 10 incluye una unidad de control 34. Se prevé que la unidad de control 34 podría, durante el uso, estar en comunicación con un motor primario del tren y el sistema de transmisión 20 con el fin de recibir señales de control del motor primario y hacer funcionar automáticamente el modo del sistema de transmisión 20 en respuesta a las señales de control.

Se prevé que el sistema de transmisión podría incluir una transmisión continuamente variable (CVT) y un conjunto de engranajes de reducción para compensar el hecho de que el volante de inercia 12 rote mucho más rápido que el eje 100. La CVT variará la relación de reducción de la transmisión para que coincida con las velocidades angulares de los árboles de entrada/salida 22, 24 y también actuará como un convertidor de par. Se cree que la relación de transmisión variable proporcionada por la CVT se logrará a través de un sistema de polea de diámetro variable (VDP) o un sistema de variador toroidal. En caso de que se use el sistema VDP, la variación en el diámetro de polea se aplicará por medio de un accionador lineal. El accionador se controlará por la unidad de control 34 e inicialmente seleccionará una relación para hacer coincidir las velocidades angulares de los árboles de entrada/salida 22, 24 con la transmisión 20. A continuación, la relación de la CVT se variará de manera que cargue o descargue el sistema de almacenamiento de energía 12, dependiendo del modo de funcionamiento. Se cree que la CVT debe estimarse para una potencia máxima de 30 kW. En una realización alternativa en la que se usa el sistema de variador toroidal, el ángulo de los rodillos de contacto se controlará en su lugar por medio de un accionador tal como un pistón hidráulico o un motor paso a paso.

En vista de los parámetros de volante de inercia mencionados anteriormente y suponiendo velocidades de tren de entre 20 km/h y 100 km/h, se determina que las relaciones de transmisión requeridas de la CVT son de entre 1:8 y 1:100. Estas relaciones podrían lograrse usando una CVT junto con dos conjuntos de engranajes de relación fija que unen los dos árboles de entrada/salida 22 y 24 con el eje 100 y el sistema de almacenamiento de energía, especialmente el volante de inercia 12. Si se supone un límite en la relación CVT de 1:8, las relaciones de transmisión máxima y mínima diferirán en un factor de 8. Debido a este factor de limitación, las relaciones de transmisión que pueden obtenerse de la transmisión 20 variarán de 1:10 a 1:80. Esto se logra usando la CVT 20 con un intervalo de relación de transmisión entre 1:1 y 1:8 junto con dos conjuntos de engranajes de reducción fijos con una relación de reducción total de 1:10.

5 Un ejemplo de una VDP CVT que podría usarse en el sistema de frenado 10 de la invención se vende actualmente en el mercado bajo la marca comercial Nissan Altima. Se cree que la eficiencia de esta CVT podría oscilar entre el 85 % y el 92 %. En la realización en la que se usa el sistema de variador toroidal, se cree que un variador toroidal tal como los fabricados por Ultimate Transmissions Pty Ltd opera con eficiencias de entre el 92 y el 97 % con relaciones de transmisión más amplias que las de una VDP.

10 Como se ha mencionado anteriormente, la unidad de control 34 del sistema 10, 40, durante el uso, conmuta el sistema de transmisión 20 entre una serie de diferentes modos de funcionamiento en respuesta a las señales de control recibidas por el mismo. Las señales de control se generan habitualmente por uno cualquiera de los motores primarios que arrastran el vagón ferroviario en el que está instalado el sistema de frenos específico 10 o por sensores adicionales. Estas señales se envían o a través de cables de señalización o de manera inalámbrica a través de comunicaciones de radiofrecuencia, por ejemplo. La unidad de control 34 seleccionará el modo de funcionamiento deseado basándose en las señales de control recibidas desde el motor primario y/o los sensores.

15 Se prevé que, durante el uso, el sistema de frenado 10 sería invisible para el conductor de la locomotora principal y en la unidad de control gestionará el sistema de frenado regenerativo 10 recibiendo la marca requerida por el conductor, la velocidad de traslación de vehículo del tren, la fuerza de acoplador del vagón y la fuerza de acoplador de la composición desde la locomotora principal. Además, se prevé que los sensores adicionales podrían incluir sensores térmicos localizados en las localizaciones de los rodamientos para detectar fallos en los rodamientos, sensores de velocidad en los ejes de las ruedas del vagón y sensores de velocidad para monitorizar la velocidad de cada volante de inercia. La unidad de control del sistema de frenado 10 recibirá señales de cada uno de estos sensores adicionales y conmutará entre los diferentes modos de funcionamiento basándose en la información contenida en las señales, así como en las señales recibidas desde la locomotora.

25 Debe entenderse que el funcionamiento y control del sistema de frenos 10 requiere una consideración cuidadosa para garantizar que el sistema 10 se ejecute tan eficazmente como sea posible y no provoque daños en el resto del tren. Es imperativo que el sistema de frenos 10 extraiga energía del tren en los momentos adecuados y que el esfuerzo de tracción, es decir, una fuerza que actúa para accionar el eje 100, se aplique estratégicamente por el sistema 10 para optimizar la eficiencia energética de tal manera que no provoque un deslizamiento entre las ruedas 30 102 y el raíl. Con el fin de operar de manera eficiente, se prevé que el sistema de frenado 10 podría funcionar entre los siguientes modos de funcionamiento:

i) Modo de aislamiento

35 En este modo, el sistema de transmisión 20 se desacopla del eje 100 del bogie y el sistema de almacenamiento de energía 12. Este modo se define como el estado en el que está el sistema de frenado 10 cuando no se proporciona control para el sistema. El sistema de almacenamiento de energía 12 no almacenará ninguna energía y el embrague 40 32 se desacoplará para aislar el sistema de almacenamiento de energía de la transmisión 20. El árbol de entrada/salida 22 también se desacoplará de la transmisión 20 desacoplando el embrague 28. Se prevé que este modo podría activarse por una señal de la locomotora principal o por cualquier señal que detecte fallos o defectos en cualquier componente del sistema.

ii) Modo de autodescarga

45 En este modo, el sistema de almacenamiento de energía 12 se desacopla del sistema de transmisión 20 y la energía se disipa del sistema de almacenamiento de energía. Este modo permite la liberación de energía desde el sistema de almacenamiento de energía 12 sin aplicar ningún esfuerzo de tracción al eje 100. Se prevé que esto podría hacerse aplicando frenos al volante de inercia 12, lo que daría como resultado que la energía se disipara en forma de calor y ruido. Una señal de sensor de velocidad en el volante de inercia 12 permitirá a la unidad de control 34 50 determinar si el sistema 10 se ha descargado lo suficiente. Habitualmente, el modo de autodescarga permitirá que el sistema de frenado 10 pase al modo de aislamiento cuando sea necesario. El modo de autodescarga puede activarse cuando se detecta un fallo en un componente del sistema (similar al modo de aislamiento) o cuando los componentes o sistemas tienen que apagarse, por ejemplo, al final del viaje del tren.

55 iii) Modo de frenado

60 En este modo el sistema de almacenamiento de energía 12 se acopla con el sistema de transmisión 20 de tal manera que se aplica un par a las ruedas 102 del bogie que actúa en una dirección para frenar las ruedas de bogie. Durante el procedimiento de frenado, la energía cinética que se retira del tren se recupera y se transfiere al volante de inercia 12 para aumentar la velocidad angular del volante de inercia. El sistema de frenos 10 recibirá una señal de control de la locomotora principal durante el frenado. Ambos embragues 28 y 32 se activarán cuando se reciba esta señal. Debe entenderse que el par que se aplica al eje 100 debe estar dentro de un cierto intervalo para garantizar que no haya deslizamiento entre las ruedas 102 y el raíl. Para controlar el deslizamiento, la velocidad de traslación del vehículo se comparará con la velocidad determinada por la velocidad de rotación de la rueda o del eje. 65 Si la velocidad de rotación del eje es mayor que la velocidad de traslación del vehículo, se reducirá el par aplicado por el sistema 10 o se desacoplará el sistema 10.

Se prevé que en una realización alternativa, en lugar de comparar la velocidad de traslación del vehículo y la velocidad de rotación del eje, el método para controlar el sistema 10 podría comprender el análisis de las fuerzas en el acoplador del vagón. El modo de frenado se desactivará cuando la señal de fuerza de acoplador esté dentro de un cierto intervalo predefinido.

5 En este modo de frenado, la velocidad del volante de inercia 12 aumentará hasta que alcance una velocidad en la que el sistema de frenos 10 esté completamente cargado. Una vez que la señal del sensor de velocidad de volante de inercia indica que el volante de inercia 12 ha alcanzado esta velocidad específica, se desactivará el modo de frenado y el sistema 10 volverá al modo inactivo.

10 iv) Modo inactivo

En este modo, se carga el sistema de almacenamiento de energía 12 pero no se carga adicionalmente ni el sistema de frenos 10 aplica un esfuerzo de tracción en el eje 100 del bogie. El sistema de frenos 10 se encontrará habitualmente en este modo cuando reciba una señal de la locomotora principal de que el tren avanza por inercia. Como alternativa, la señal de fuerza de acoplador mencionada anteriormente en iii) con referencia a la realización alternativa, puede usarse para conmutar el sistema de frenos 10 al modo inactivo cuando la fuerza de acoplador está en un intervalo predeterminado.

20 v) Modo de accionamiento

En este modo, el sistema de almacenamiento de energía 12 se acopla con el sistema de transmisión 20 de tal manera que se aplica un par a las ruedas 102 del bogie que actúa en una dirección para accionar las ruedas de bogie. Durante el uso, el sistema de frenos 10 recibirá una señal de control de la locomotora principal cuando se requiera potencia. Ambos embragues 28 y 32 se acoplarán cuando se reciba esta señal. Debe entenderse de nuevo que el par que se aplica al eje 100 debe estar dentro de un cierto intervalo para garantizar que no haya deslizamiento entre las ruedas 102 y el raíl. El deslizamiento entre las ruedas 102 y el raíl se monitoriza de la misma manera que se ha expuesto anteriormente, es decir, monitorizando la velocidad de traslación del vehículo y la velocidad de rotación del eje. Si la velocidad de rotación del eje es mayor que la velocidad de traslación del vehículo, se reducirá el par aplicado por el sistema de frenos 10 o se desacoplará el sistema 10.

Se prevé de nuevo que en una realización alternativa, en lugar de comparar la velocidad de traslación del vehículo y la velocidad de rotación del eje, el método para controlar el sistema 10 podría comprender el análisis de las fuerzas en el acoplador del vagón. El modo de frenado se desactivará cuando la señal de fuerza de acoplador esté dentro de un cierto intervalo predefinido.

En el modo de accionamiento, la velocidad del volante de inercia 12 se reducirá hasta que alcance una velocidad en la que el sistema esté completamente descargado. Una vez que la señal del sensor de velocidad de volante de inercia indica que el volante de inercia ha alcanzado esta velocidad específica, se desactivará el modo de accionamiento y el sistema 10 volverá al modo inactivo.

También se cree que el sistema de frenos 10 podría actuar como una unidad de emergencia en caso de que se desactivase el motor primario. Este modo de accionamiento de emergencia será sustancialmente similar al modo de accionamiento normal.

Ahora que el sistema de frenos 10 y su método de funcionamiento se han descrito en detalle, debe quedar claro que una ventaja significativa del sistema de frenado 10 es que puede instalarse en cada eje del bogie. Para ilustrar esto, el sistema 10 se ilustra como una unidad compacta en la figura 3. A partir de esta figura, puede verse que se instala un sistema de frenado regenerativo 10 de acuerdo con la invención entre las dos ruedas 102 de cada eje 100 del bogie. La unidad ensamblada tendrá puntos de montaje mediante los cuales puede fijarse al bogie. En la realización preferida, el sistema de frenado 10 está diseñado para tener una vida útil que sea mayor que la del bogie, garantizando de este modo que en condiciones de funcionamiento normales, el sistema 10 no requerirá ningún mantenimiento hasta que el bogie se retire del vagón. Los inventores prevén una vida útil del sistema requerida de 20 años.

A partir de la descripción anterior, debe quedar claro que podría incluirse una serie de sistemas de frenado individuales 10 en un sistema de gestión de energía regenerativa para un tren que tiene un motor primario y una serie de vagones ferroviarios. Habitualmente, los sistemas de frenado 10 se instalarán en vagones a lo largo del tren, de manera que la energía pueda recuperarse en o aplicarse desde el sistema de almacenamiento de energía 12 a través de sustancialmente todo el tren. Las unidades de control de los sistemas de frenado regenerativo 10 también se comunican independientemente con el motor primario y/o los sensores adicionales. Esto permite que los sistemas de frenado 10 puedan hacerse funcionar independientemente unos de otros. El sistema de gestión de energía regenerativa es, por lo tanto, un sistema distribuido, lo que es una ventaja significativa en comparación con los sistemas regenerativos convencionales.

65

Otra ventaja del sistema de frenado regenerativo 10 es que, predominantemente, es un sistema mecánico que almacena energía en forma mecánica o cinética. En comparación con los sistemas de frenado regenerativo conocidos, el sistema 10 es significativamente más simple y, en consecuencia, más rentable de instalar, mantener y hacer funcionar a través de una red ferroviaria.

5 Se cree además que el uso del sistema de frenado regenerativo 10 podría reducir las fuerzas de acoplador, lo que es una ventaja significativa del sistema 10. Los expertos en la materia apreciarán que al reducir las fuerzas de acoplador, la longitud total del tren puede aumentarse, lo que, a su vez, tiene beneficios financieros significativos.

10 Haciendo referencia ahora a la figura 4, un ejemplo no limitante de una segunda realización de un sistema de frenado regenerativo de acuerdo con la invención se indica, en general, por el número de referencia 40. En los dibujos adjuntos, los números similares indican características similares. El sistema 40 es sustancialmente similar al sistema 10 y, en consecuencia, la descripción anterior con referencia al sistema 10 se aplica en la medida de lo posible al sistema 40. La diferencia más significativa entre el sistema 10 y el sistema 40 es la localización de su volante de inercia. Debe entenderse que el volante de inercia puede localizarse en diferentes posiciones en el bogie y no está limitado a las dos localizaciones que se indican en los sistemas 10, 40 de las figuras 1 y 4, respectivamente.

20 De manera similar a la figura 1, una parte de un eje de un bogie ferroviario se indica por el número de referencia 100. A partir de la representación esquemática puede verse que el sistema 40 incluye un sistema de almacenamiento de energía (ESS) para almacenar energía en forma cinética/mecánica. En esta segunda realización del sistema 40, el ESS incluye de nuevo un volante de inercia 42. Sin embargo, en lugar de montarse coaxialmente con el eje de bogie 100 como en el sistema 10 de acuerdo con la primera realización de la invención, el volante de inercia 42 se monta en un árbol 44. El volante de inercia 42 se monta en el árbol 44 de tal manera que rotan en armonía. Como se muestra en la figura 4, el árbol 44 discurre paralelo al eje de bogie 100 y está soportado por los rodamientos 46.1 y 46.2 para permitir la rotación del eje. Los rodamientos 46.1 y 46.2 se localizan en las regiones de extremo del árbol 44 a cada lado del volante de inercia 42.

30 De manera similar al sistema 10 de acuerdo con la primera realización de la invención, el sistema de frenado regenerativo 40 incluye un sistema de transmisión 20 que puede hacerse funcionar selectivamente entre los diferentes modos como se ha establecido anteriormente. El sistema de transmisión 20 del sistema 40 es idéntico al sistema de transmisión 20 del sistema 10 y, por lo tanto, no se describirá en detalle de nuevo.

35 Haciendo referencia aún a la figura 4, puede verse que el sistema de transmisión 20 tiene de nuevo unos árboles de entrada/salida primero y segundo 22 y 24, que son sustancialmente similares a los árboles de entrada/salida 22, 24 del sistema 10. Como se ha mencionado anteriormente con referencia al sistema 10, cada árbol 22, 24 podría funcionar o como un árbol de entrada o como un árbol de salida dependiendo del modo de funcionamiento del sistema de transmisión 20.

40 En esta segunda realización ilustrada, los árboles de entrada/salida 22, 24 se montan coaxialmente con el árbol 44 en el que está montado el volante de inercia 42. El árbol de entrada/salida 24 se conecta mecánicamente al árbol 44 mientras que el árbol de entrada/salida 22 está soportado por un rodamiento 48. Esta conexión mecánica entre los árboles 24 y 44 puede tener una relación de transmisión entre los mismos. Se prevé que la conexión mecánica podría tener la forma de un conjunto de engranajes, un sistema de correa y polea, una cadena de transmisión o cualquier otra conexión mecánica capaz de lograr la relación de transmisión deseada. En esta segunda realización del sistema 40, la conexión mecánica entre el árbol de entrada/salida 24 forma un enlace de transmisión a volante de inercia.

50 Un embrague 50 está localizado entre el sistema de transmisión 20 y el rodamiento 48, y se monta coaxialmente con el árbol de entrada/salida 22. El embrague 50 puede hacerse funcionar para conectar y desconectar el sistema de transmisión 20 a un enlace de transmisión a eje 26 que comprende los engranajes 26.1 y 26.2, conectando y desconectando de este modo el sistema de transmisión 20 al eje de bogie 100. El enlace de transmisión a eje 26 es idéntico al enlace de transmisión a eje 26 del sistema 10 y, por lo tanto, no se describe en detalle de nuevo. Debe entenderse que el enlace de transmisión a eje 26 puede hacerse funcionar con eficacia para conectar y desconectar el volante de inercia 42 al eje de bogie 100.

Aunque en la figura 4 que muestra la segunda realización del sistema 40 solo se indica un embrague 50 localizado en el árbol 22, se prevé que un segundo embrague podría localizarse en el árbol 24 de manera similar a la primera realización del sistema 10.

60 Para controlar la transferencia de energía a través del sistema de transmisión 20, es decir, para controlar el funcionamiento del embrague 50, así como la relación de transmisión del sistema de transmisión 20, el sistema de frenado 40 tiene una vez más una unidad de control 34. De nuevo se prevé que la unidad de control podría, durante el uso, estar en comunicación con un motor primario del tren y el sistema de transmisión 20 con el fin de recibir señales de control del motor primario y hacer funcionar automáticamente el modo del sistema de transmisión 20 en respuesta a las señales de control.

De manera similar al sistema 10, el sistema de transmisión podría incluir una transmisión continuamente variable (CVT) y un conjunto de engranajes de reducción para compensar el hecho de que el volante de inercia 42 rote mucho más rápido que el eje 100. En la figura 4, el conjunto de engranajes de reducción se indica por el número 52. De nuevo, la CVT variará la relación de reducción del sistema de transmisión 20 para que coincida con las velocidades angulares de los árboles de entrada/salida 22, 24 y también actuará como un convertidor de par.

Como se ilustra en la figura 4, el sistema 40 está localizado en un recinto 54, que tiene tres compartimentos indicados por los números de referencia 56, 58 y 60, respectivamente. El primer compartimento 56 aloja al menos una parte del eje 100 del bogie y al menos algunos de los rodamientos que montan el eje. El segundo compartimento 58 aloja el volante de inercia 42. Se prevé que podría crearse un vacío dentro del segundo compartimento 58. El tercer compartimento 60 aloja el embrague 50, el sistema de transmisión 20 y el conjunto de engranajes de reducción 52. Se prevé que el embrague 50 podría ser un embrague húmedo.

En principio, el funcionamiento del sistema 40 es idéntico al del sistema 10 y, por lo tanto, no se describirá de nuevo en detalle. Sin embargo, debe entenderse que deben realizarse cambios menores en el funcionamiento del sistema 40 a la vista del cambio en la configuración de los componentes del mismo. Los diferentes modos de funcionamiento del sistema 40 son idénticos a los del sistema 10. Sin embargo, el funcionamiento o el control de los componentes individuales con el fin de conmutar entre los diferentes modos varía ligeramente debido al cambio en la configuración de los componentes. Por ejemplo, en el sistema 40 el volante de inercia 42 nunca se desconecta por completo del sistema de transmisión 20. Por lo tanto, el sistema de transmisión 20 rotará en armonía con el volante de inercia 42. En otras palabras, el sistema de transmisión 20 girará constantemente cuando el volante de inercia 42 esté girando pero no se transmitirá ningún par cuando el embrague 50 esté desacoplado.

**PREDICCIÓN DE LA EFICIENCIA Y EL AHORRO DE ENERGÍA DEL SISTEMA**

La eficiencia y posible ahorro de energía del sistema de frenos 10 se predicen teóricamente a continuación usando los parámetros de diseño mencionados anteriormente.

**Predicción de primer orden**

Con el fin de determinar la eficiencia general del sistema de frenado 10, se combinarán la eficiencia de la transmisión 20 y del ESS 12. Las pérdidas asociadas con la transmisión incluyen los dos conjuntos de engranajes de relación fija, así como la eficiencia de CVT, y se determina que sean del 82,8 % como se ve en la tabla 3.

Eficiencia de engranaje fijo ( $n_G$ )	97 %
Eficiencia de CVT promedio ( $n_{CVT}$ )	88 %
Eficiencia de transmisión ( $n_T = n_G * n_{CVT} * n_G$ )	82,8 %

**Tabla 3: eficiencia de transmisión**

Las pérdidas de rodamiento y las pérdidas de resistencia aerodinámica son las dos ineficiencias principales del ESS. Para el fin de este estudio, se asume que el ESS se autodescargará completamente en un tiempo de tres horas y que la velocidad de rotación del volante de inercia disminuirá de manera cuadrática. La figura 5 muestra cómo se caracteriza la disminución en la velocidad de rotación del volante de inercia y la ecuación cuadrática que puede usarse para estimar la velocidad de rotación en función del tiempo.

La autodescarga parasitaria del ESS significa que la eficiencia general del sistema de frenos disminuye con el tiempo a medida que la energía se almacena en el ESS. La figura 6 muestra la eficiencia general del sistema de frenos en función del tiempo que la energía está almacenada en el ESS, teniendo en cuenta la eficiencia general del sistema que la energía pasará dos veces a través de la transmisión.

**Simulación**

Con el fin de calcular la capacidad de ESS requerida y la eficiencia del sistema de frenos anteriormente, tuvieron que hacerse varias suposiciones para facilitar los cálculos. Las suposiciones que se hicieron pueden no ser del todo precisas, pero fueron necesarias para proporcionar resultados de primer orden para comprender mejor los requisitos de la invención.

Con el fin de predecir con mayor precisión la capacidad de ESS, la eficiencia del sistema de frenos y el ahorro de energía que producirá el sistema, tuvo que hacerse un análisis de los datos disponibles del tren por simulación.

**Algoritmo de simulación**

ESS - Carga y descarga

El algoritmo que realiza la simulación usa tres campos de entrada para realizar la simulación; son las etapas de tiempo, la potencia aplicada por la composición de locomotora y la velocidad del tren. También se requiere un

conjunto de parámetros que describan el sistema de frenos. Incluyen la capacidad de ESS, la tasa de autodescarga de ESS, la eficiencia de transmisión y el número de sistemas de frenos en el tren.

5 La simulación se dirige a los requisitos de potencia del tren para cada etapa de tiempo en los datos del viaje. A continuación, puede determinarse si el tren se encuentra actualmente en la operación de motorización o de frenado. Si el tren se encuentra en la operación de motorización, el algoritmo comprueba si hay suficiente energía en el ESS para entregar la potencia y, de ser así, registra que la potencia (o un porcentaje de la potencia) se entrega por el sistema de frenos y el ESS se descarga. La potencia que no puede proporcionar el sistema de frenos se registra para que la proporcione el motor primario (composición de locomotora).

10 Si se descubre que el tren se encuentra en la operación de frenado, el algoritmo comprueba el nivel de carga del ESS. Si el ESS no está completamente cargado, el frenado se realiza por el sistema de frenado y se carga el ESS. El nivel de carga del ESS se registra a lo largo de la simulación.

15 Para la carga y descarga del ESS, la eficiencia de transmisión se incorpora por el algoritmo. El algoritmo también incluye las pérdidas de autodescarga del ESS siempre que haya energía almacenada en el ESS.

Par

20 El par aplicado al eje durante la operación de motorización y frenado se calcula a lo largo de la simulación. Se usa la ecuación 1 y con la potencia (P) conocida, la velocidad de rotación del eje ( $\omega$ ) puede calcularse convirtiendo la velocidad del tren a la velocidad de rotación con el diámetro de contacto de rueda conocido.

$$P = T \times \omega \quad (1)$$

25 Velocidad de rotación de ESS

La velocidad de rotación del volante de inercia puede calcularse para cada etapa de tiempo del viaje convirtiendo el valor energético del nivel de carga del ESS a la velocidad de rotación usando la ecuación 2.

30

$$E = \frac{1}{2} \times m \times \omega^2 \quad (2)$$

La velocidad angular resultante obtenida a partir de la ecuación 2 tendrá unidades de rad/s que pueden convertirse fácilmente a rpm.

35 Relación de transmisión general

40 Con las velocidades de rotación tanto de los ejes de los vagones como del volante de inercia del EES conocido, es posible calcular la relación de transmisión total para la transmisión a lo largo de todo el viaje. La ecuación 3 se usa para hacer esto.

$$GR = \frac{\omega_{\text{volante de inercia}}}{\omega_{\text{eje}}} \quad (3)$$

45 Ahorro de energía y eficiencia del sistema de frenos

50 Para determinar la cantidad de energía que se entrega al tren por la combinación de todos los sistemas de frenos, la energía que se aplica como energía de tracción desde el ESS se rastrea en cada etapa de tiempo. La suma de la energía de tracción aplicada para cada etapa de tiempo proporciona la energía total entregada por el sistema de frenos. Este resultado es la cantidad de energía que se ahorra con la implementación del sistema de frenos, ya que esta energía se habría proporcionado por el motor primario en ausencia del sistema de frenos.

55 La fracción de energía proporcionada por el motor primario sobre la energía total requerida, así como la fracción que representa el ahorro de energía (energía proporcionada por el sistema de frenos) se calcula a continuación por el algoritmo.

Resultados de la simulación

60 El viaje que se analizó y simuló es un viaje entre City Deep en Johannesburgo y Umbilo en Durban. El viaje cubre una distancia de 644,19 km y se tarda 15 h y 22 min en completar. En esta etapa, la variación de la instalación de uno o dos sistemas de frenos se introduce en cada bogie de vagón. La simulación se realizó dos veces para

investigar qué efecto tendría. Los parámetros característicos del ESS para las dos simulaciones se dan a continuación en la tabla 4.

Parámetro	Escenario 1	Escenario 2
Número de vagones	50	50
Número de sistemas de frenado por bogie	2	1
Número de sistemas de frenado por vagón	4	2
Capacidad energética por sistema de frenado	1,389 kWh	2,222 kWh
Tiempo de autodescarga de ESS	120 min	120 min
Tasa de autodescarga por sistema de frenado	854,8 W	1164 W
Eficiencia de transmisión	82,8 %	82,8 %

**Tabla 4: parámetros del sistema de frenado**

5

Parámetro	Escenario 1	Escenario 2
Energía de motorización total requerida	15 063 kWh	15 063 kWh
Energía proporcionada por motor primario	11 526 kWh (76,6 %)	11 473 kWh (75,54 %)
Ahorro de energía	3 528 kWh (23,4 %)	3 590 kWh (24,30 %)
Energía recuperada por un solo sistema de frenado	17,64 kWh	35,90 kWh
Fracción de energía de frenado capturada	63,97 %	56,53 %
Eficiencia general del sistema de frenos	46,62 %	54,75 %

**Tabla 5: resultados del viaje relacionados con la energía**

10 El uso de energía se representa gráficamente en la figura 7. La línea superior indica la cantidad total de energía usada para la motorización durante la duración del viaje; esto representa la cantidad de energía suministrada por las locomotoras sin ningún sistema de frenado regenerativo presente. La línea central representa la menor cantidad de energía requerida por las locomotoras con la aplicación del sistema de frenos. La línea inferior muestra la energía recuperada y suministrada por el sistema de frenos, esto representa la cantidad de energía que se ahorra para el viaje.

15 La combinación de todo el sistema de frenos podría realizar el 63,97 % de todo el frenado requerido en el primer escenario, y el 56,63 % del frenado en el segundo escenario. La eficiencia general del sistema de frenos es del 46,62 %, lo que significa que un promedio del 46,62 % de la energía puesta en el sistema se devuelve al tren en forma de energía de tracción.

20 La figura 8 muestra el estado de carga del ESS de cada sistema de frenos individual para la primera simulación. Se observa que el ESS nunca se satura durante períodos prolongados, y tampoco se satura a lo largo del viaje con mucha frecuencia. Los resultados para el escenario 2 fueron muy similares al resultado mostrado en la figura 8: estado de carga de ESS para la simulación 1. Esto es una indicación de que el tamaño del ESS seleccionado es relativamente bueno, sin embargo, deberá realizarse un proceso de optimización para determinar el mejor tamaño posible del ESS.

25 A continuación, se considera la curva de potencia de un solo sistema de frenos como se ve en la figura 9. Es importante monitorizar este parámetro ya que se desea evitar picos de alta potencia sobre el eje. La figura 9 muestra los resultados del primer escenario; la línea superior indica la potencia aplicada durante la operación de motorización que tiene un valor máximo de 29 kW. La línea inferior indica la potencia durante la operación de motorización y tiene un valor absoluto máximo de 27 kW. Ambos valores extremos son razonablemente bajos y están dentro del valor máximo permitido de 35 kW.

30 La figura 10 muestra el par aplicado al eje durante ambas operaciones de motorización y de frenado para el primer escenario, representadas por las líneas superior e inferior, respectivamente. El par máximo aplicado durante la motorización es de 1156 Nm, mientras que el par máximo aplicado durante el frenado es de 832 Nm. Aunque estos valores de par son altos, es importante darse cuenta de que este es el par aplicado al eje de rueda, y no necesariamente el par que se aplicará a la transmisión. Haciendo referencia de nuevo al diseño del sistema en la figura 1, los engranajes de reducción antes de la CVT reducirán el par en la misma proporción que aumenta la velocidad angular.

35 Finalmente, se consideran los resultados obtenidos para la relación de transmisión requerida entre el volante de inercia y el eje. La figura 11 muestra los resultados obtenidos durante la duración del viaje del primer escenario. El sistema de frenos estaba restringido para funcionar solo cuando el tren se estuviera moviendo a velocidades superiores a 20 km/h. La relación de transmisión máxima requerida es de 99,5, y la relación de transmisión mínima obtenida es de 11,7. Vale la pena señalar que la relación de transmisión máxima solo fue necesaria en algunos casos. Los resultados del segundo escenario son casi idénticos a estos con diferentes límites superiores e inferiores.

45

La tabla 6 muestra los resultados que son relevantes para el tren de potencia del sistema de frenos. Los resultados muestran que para el escenario dos, el sistema de transmisión requerirá un par y una potencia nominal mucho más altos que para el escenario uno. Los requisitos de relación de transmisión se encuentran en un intervalo más amplio para el escenario dos, pero esto podría mitigarse si fuera necesario seleccionando un volante de inercia diferente.

5

<b>Parámetro</b>	<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>
Par máximo de motorización (N.m)	872	1743
Par máximo de frenado (N.m)	832	1668
Potencia máxima de motorización (kW)	29,07	58,13
Potencia máxima de frenado (kW)	27,02	54,04
Relación de transmisión máxima	99,5	104,8
Relación de transmisión mínima	11,68	10,05

**Tabla 6: resultados de los requisitos de transmisión**

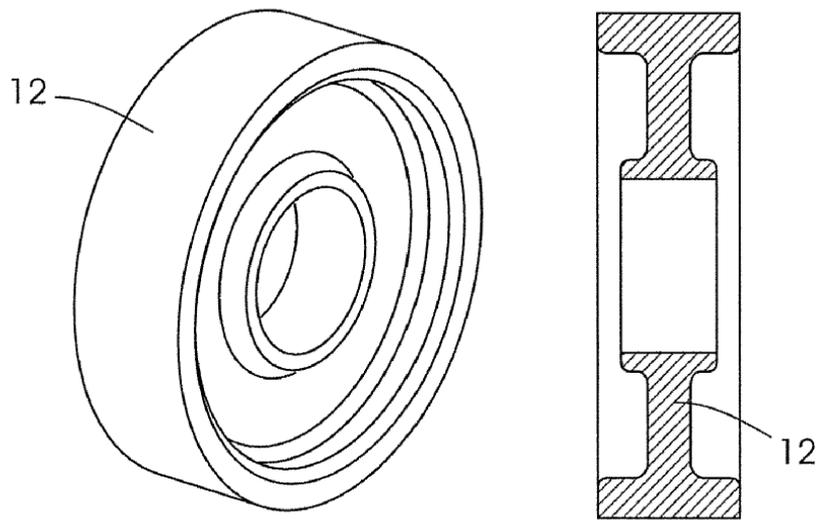
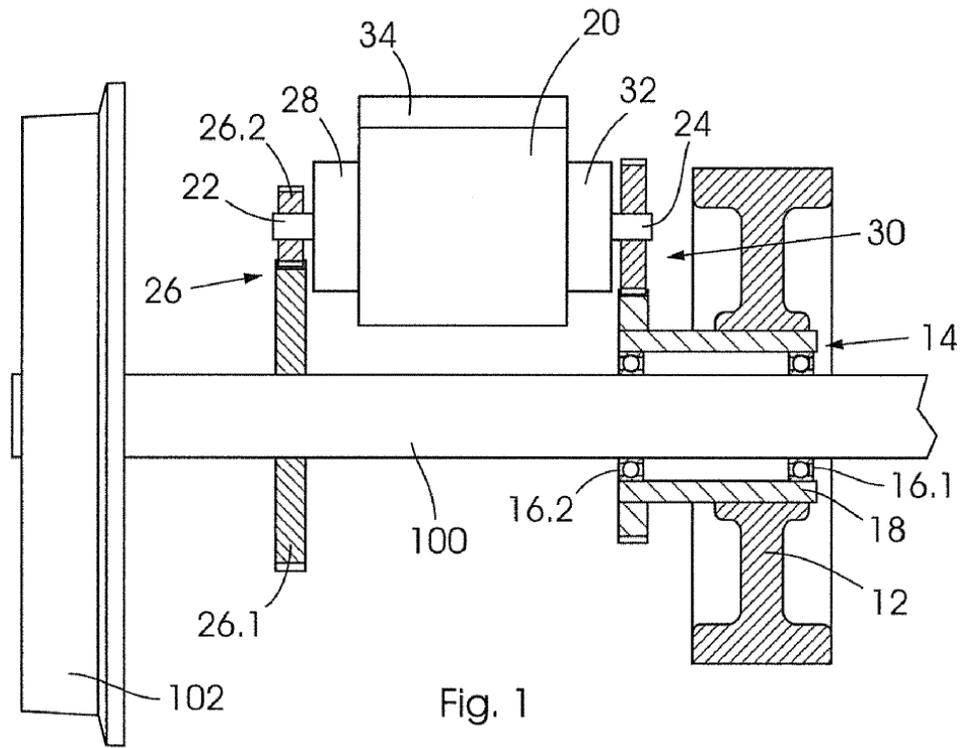
**REIVINDICACIONES**

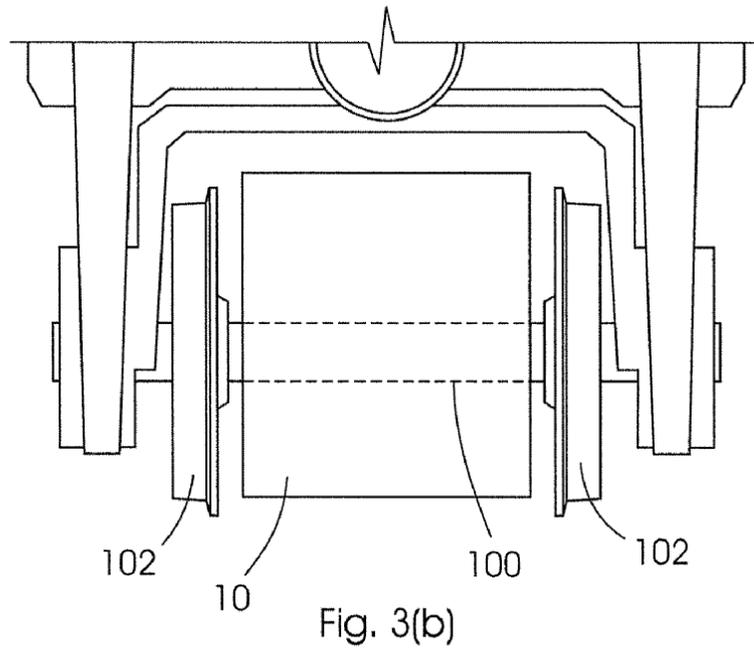
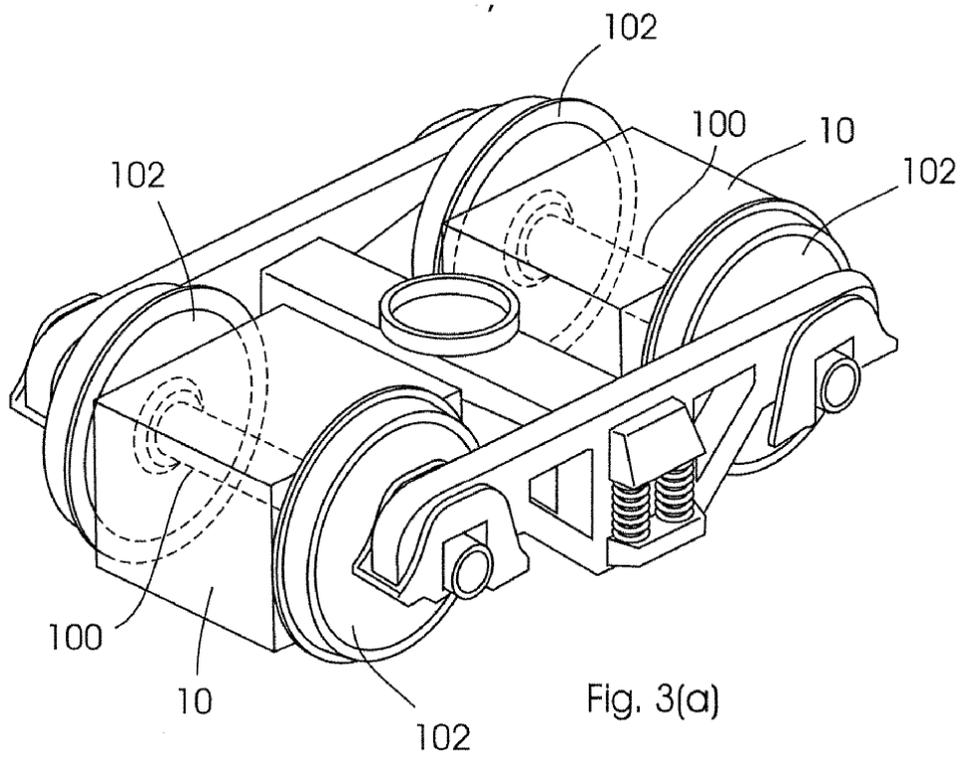
1. Un sistema de frenado regenerativo mecánico (10, 40) para su instalación en un bogie de un vehículo ferroviario no motorizado, caracterizado por que el sistema regenerativo (10, 40) incluye:
- 5 un sistema de almacenamiento de energía para almacenar energía en forma mecánica o cinética; y un sistema de transmisión (20) que puede hacerse funcionar selectivamente entre diferentes modos que incluyen:
- 10 i) un modo de frenado, en el que se transmite energía mecánica o cinética desde un eje (100) del bogie al sistema de almacenamiento de energía;
- ii) un modo de accionamiento, en el que se transmite energía mecánica o cinética desde el sistema de almacenamiento de energía al eje (100) del bogie; y
- 15 iii) un modo inactivo, en el que se carga el sistema de almacenamiento de energía pero no se carga adicionalmente ni se aplica un esfuerzo de tracción al eje (100) del bogie; y
- una unidad de control (34) que está, durante el uso, en comunicación con un motor primario y el sistema de transmisión (20) con el fin de recibir señales de control del motor primario y hacer funcionar automáticamente el modo del sistema de transmisión (20) en respuesta a las señales de control.
- 20 2. Un sistema de frenado regenerativo (10, 40) de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado por que los modos del sistema de transmisión (20) incluyen:
- 25 iii) un modo de aislamiento, en el que el sistema de transmisión (20) se desacopla de un eje (100) de un bogie y del sistema de almacenamiento de energía; y
- iv) un modo de autodescarga, en el que el sistema de almacenamiento de energía se desacopla del sistema de transmisión (20) y la energía se disipa del sistema de almacenamiento de energía.
- 30 3. Un sistema de frenado regenerativo (10, 40) de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, caracterizado por que incluye un enlace de transmisión a eje (26) para transmitir energía mecánica o cinética entre el eje (100) del bogie y el sistema de transmisión (20).
- 35 4. Un sistema de frenado regenerativo (10, 40) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado por que el sistema de almacenamiento de energía incluye un volante de inercia (12).
5. Un sistema de frenado regenerativo (10, 40) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizado por que el sistema de frenado regenerativo (10, 40) incluye un enlace de transmisión a sistema de almacenamiento de energía (30).
- 40 6. Un bogie ferroviario que incluye un sistema de frenado regenerativo (10, 40) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5 instalado en cada eje (100) del bogie, caracterizado por que los sistemas de frenado (10, 40) pueden hacerse funcionar independientemente unos de otros.
- 45 7. Un sistema de gestión de energía regenerativa para un tren que tiene un motor primario y una serie de vagones ferroviarios, incluyendo el sistema de gestión de energía una serie de sistemas de frenado regenerativo de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6 instalados en cada uno de los vagones ferroviarios, caracterizado por que las unidades de control de los sistemas de frenado regenerativo están en comunicación independiente con el motor primario.
- 50 8. Un método de funcionamiento de un sistema de frenado regenerativo (10, 40) de un bogie de un vehículo ferroviario no motorizado, incluyendo el sistema (10, 40) un sistema de almacenamiento de energía para almacenar energía en forma mecánica o cinética, un sistema de transmisión (20) y una unidad de control (34) para controlar el sistema de transmisión (20), caracterizado por que el método incluye:
- 55 recibir una señal de control; y conmutar entre diferentes modos de funcionamiento en respuesta a la señal de control, en el que los diferentes modos incluyen los siguientes:
- 60 vi) un modo de frenado, en el que el sistema de almacenamiento de energía se acopla con el sistema de transmisión (20) de tal manera que se aplica una fuerza a las ruedas (102) del bogie que actúa en una dirección frenando las ruedas de bogie (102), cargando de este modo el sistema de almacenamiento de energía;
- vii) un modo inactivo, en el que se carga el sistema de almacenamiento de energía pero no se carga adicionalmente ni se aplica un esfuerzo de tracción al eje (100) del bogie; y
- 65 viii) un modo de accionamiento, en el que el sistema de almacenamiento de energía se acopla con el sistema de transmisión (20) de tal manera que se aplica una fuerza a las ruedas (102) del bogie que actúa en una

dirección accionando las ruedas de bogie (102).

9. Un método de acuerdo con la reivindicación 8, caracterizado por que los diferentes modos incluyen:

- 5 ix) un modo de aislamiento, en el que el sistema de transmisión (20) se desacopla de un eje (100) de un bogie y del sistema de almacenamiento de energía; y  
x) un modo de autodescarga, en el que el sistema de almacenamiento de energía se desacopla del sistema de transmisión (20) y la energía se disipa del sistema de almacenamiento de energía.
- 10 10. Un método de acuerdo con la reivindicación 9, caracterizado por que el modo de aislamiento se activa por una señal que detecta fallos o defectos en cualquier componente del sistema, y/o por que el modo de autodescarga se activa por una señal que detecta un fallo del componente del sistema o por una señal de que es necesario apagar los componentes del sistema al final de un viaje, y/o por que el modo de autodescarga se desactiva por una señal de sensor de velocidad que indica que el sistema de almacenamiento de energía se ha descargado lo suficiente, y/o en  
15 el que el modo de frenado se activa por una señal procedente de la locomotora principal durante el frenado.
11. Un método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 8 a 10, caracterizado por que incluye mantener el par que se aplica al eje (100) del bogie durante el modo de frenado y/o el modo de accionamiento por el sistema de frenado regenerativo (10, 40) dentro de un intervalo que garantice que no haya un deslizamiento entre  
20 las ruedas (102) del bogie y el rail, y por que incluye, preferentemente, monitorizar el deslizamiento comparando la velocidad de traslación del vehículo con la velocidad determinada a partir de la velocidad de la rueda (102) o del eje (100) del bogie.
12. Un método de acuerdo con la reivindicación 11, caracterizado por que incluye reducir el par que se aplica por el sistema de frenado regenerativo (10, 40) durante el modo de frenado o el modo de accionamiento si la velocidad de rotación del eje (100) es mayor que la velocidad de traslación del vehículo.
- 25 13. Un método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 8 a 12, caracterizado por que el modo de frenado se desactiva por una señal de sensor de velocidad que indica que el sistema de almacenamiento de energía está completamente cargado.
- 30 14. Un método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 8 a 12, caracterizado por que incluye medir las fuerzas de acoplador del vagón ferroviario y desactivar el modo de frenado o el modo de accionamiento cuando la señal de fuerza de acoplador está dentro de un intervalo predeterminado.
- 35 15. Un método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 8 a 14, caracterizado por que el modo inactivo se activa por una señal de que el tren avanza por inercia, o por una señal de que las fuerzas de acoplador están dentro de un intervalo predeterminado.
- 40 16. Un método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 8 a 15, caracterizado por que el modo de accionamiento se activa por una señal de que se requiere potencia, y por que la señal que indica que se requiere potencia se recibe, preferentemente, desde la locomotora principal.





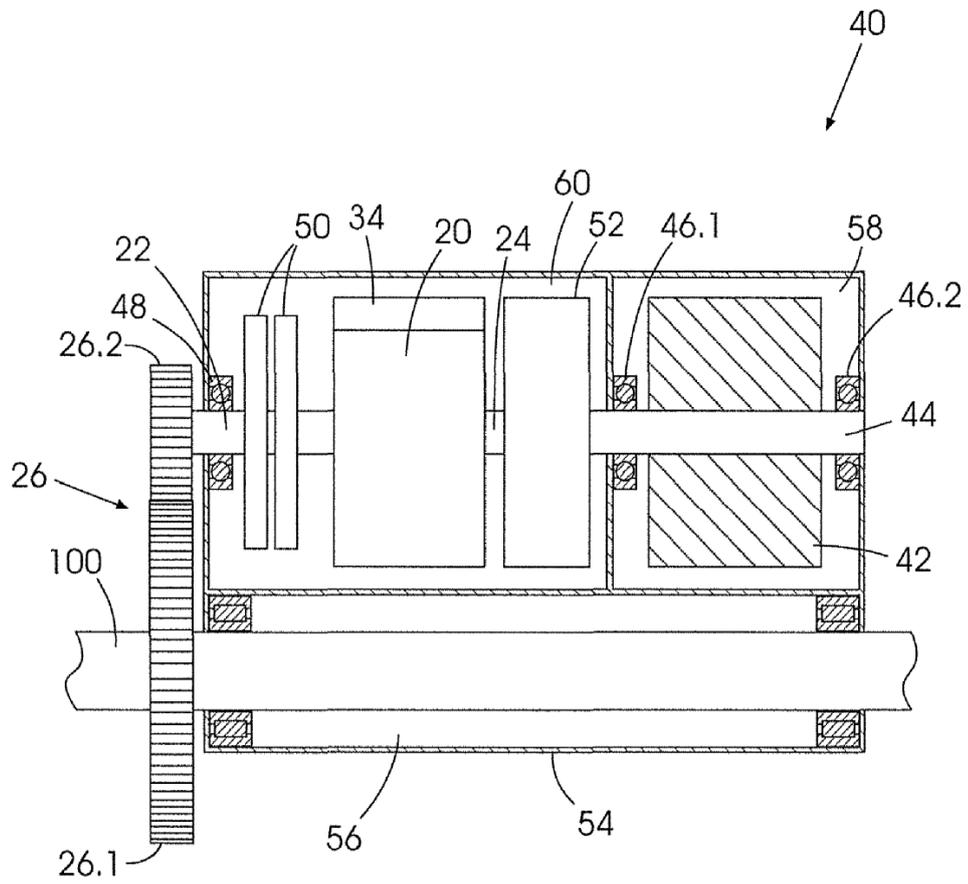


Fig. 4

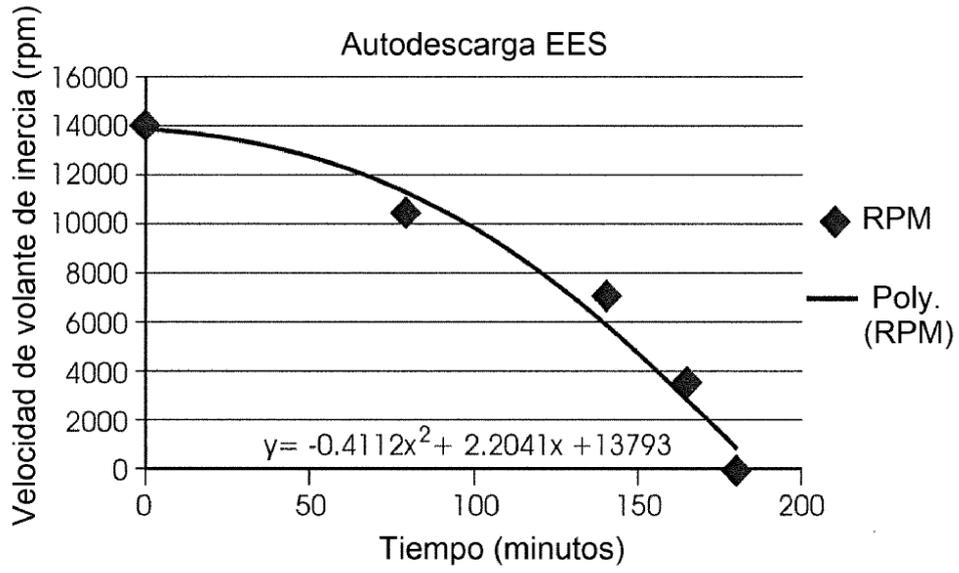


Fig. 5

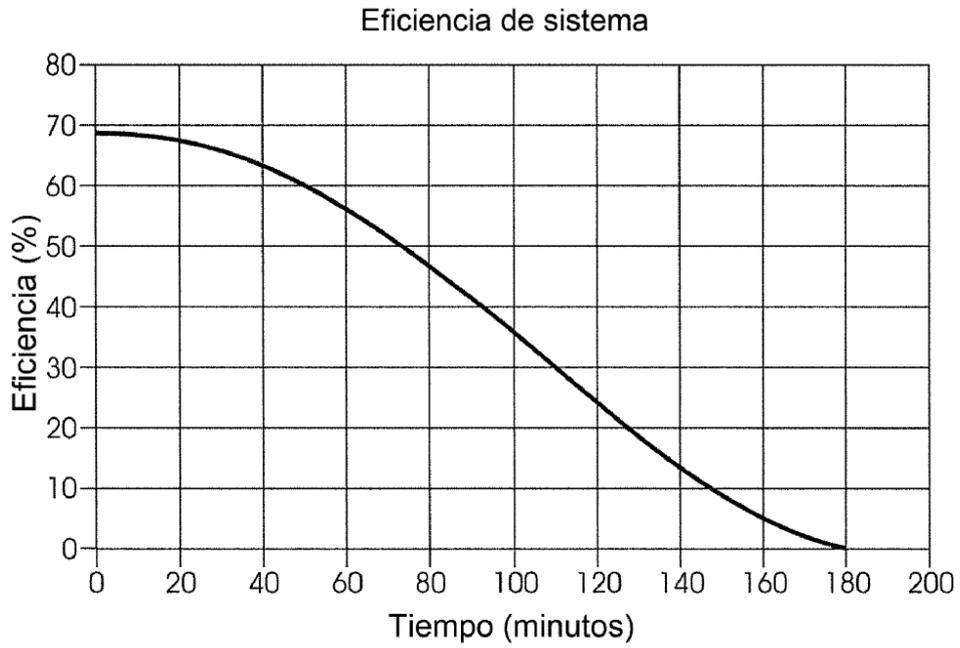
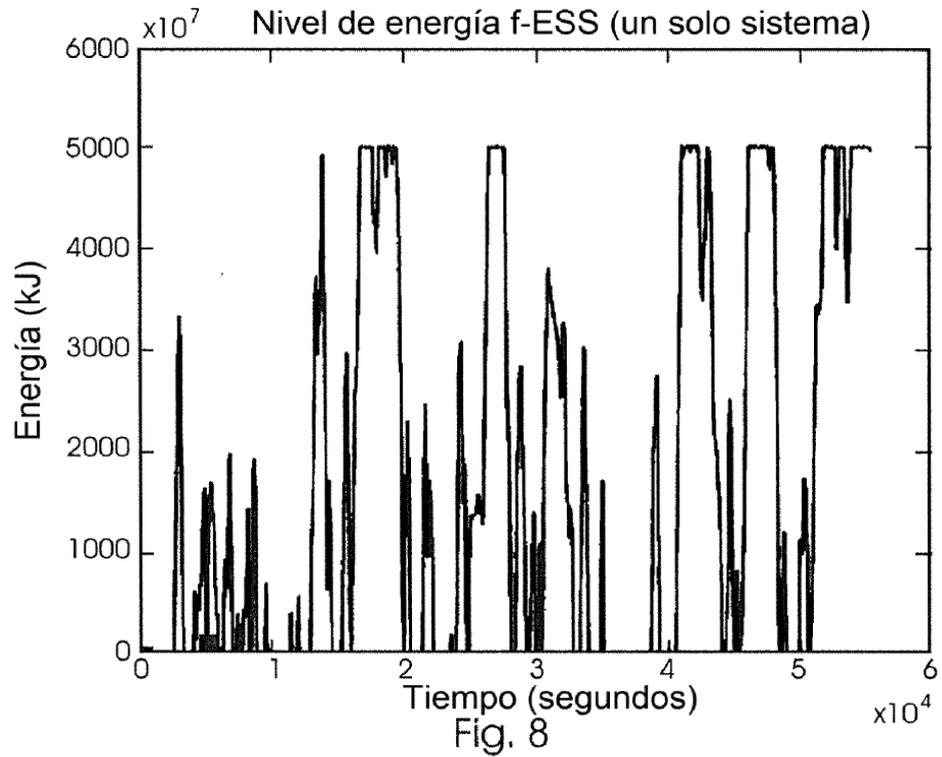
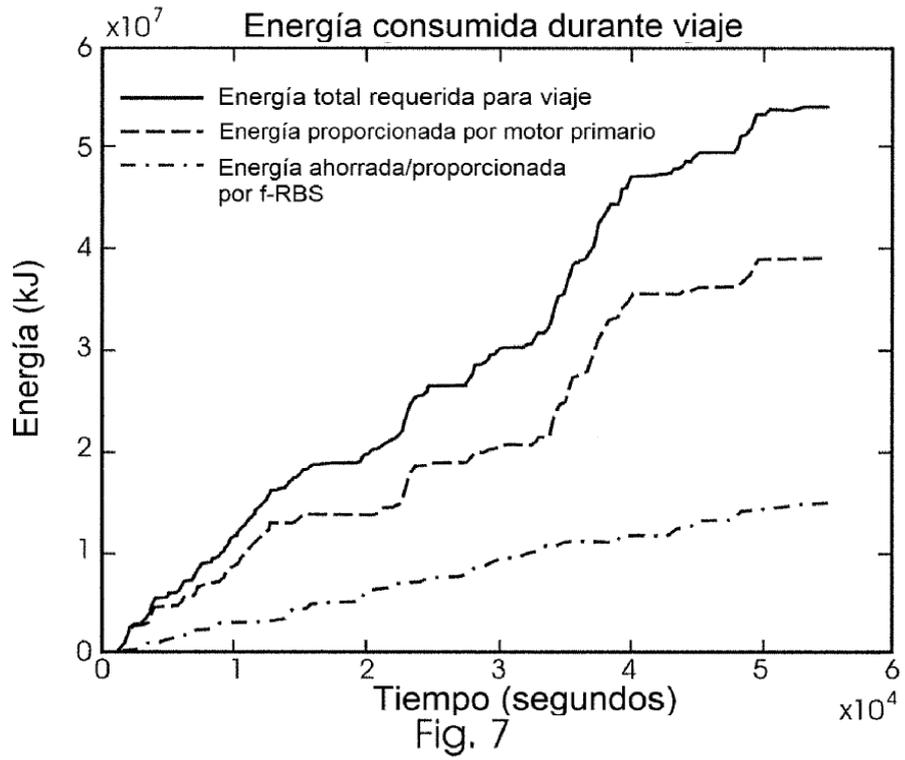
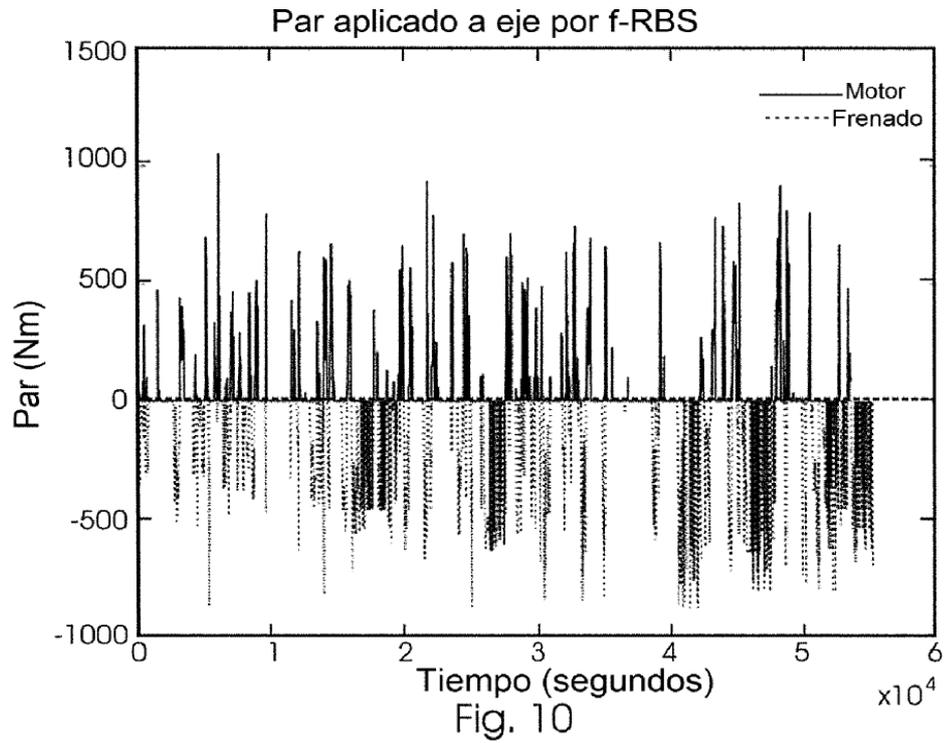
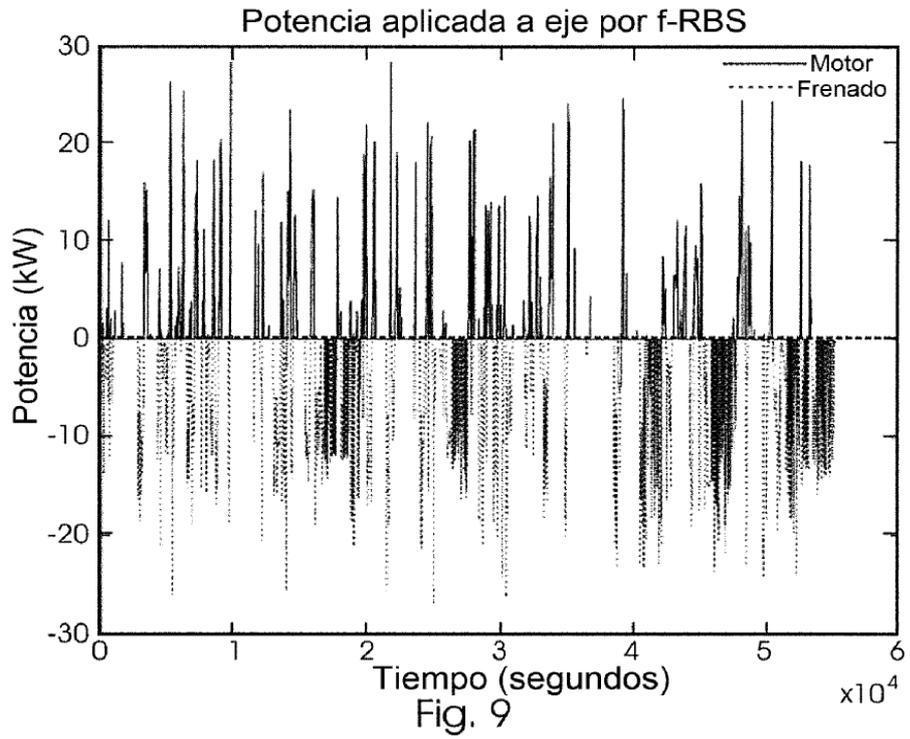


Fig. 6





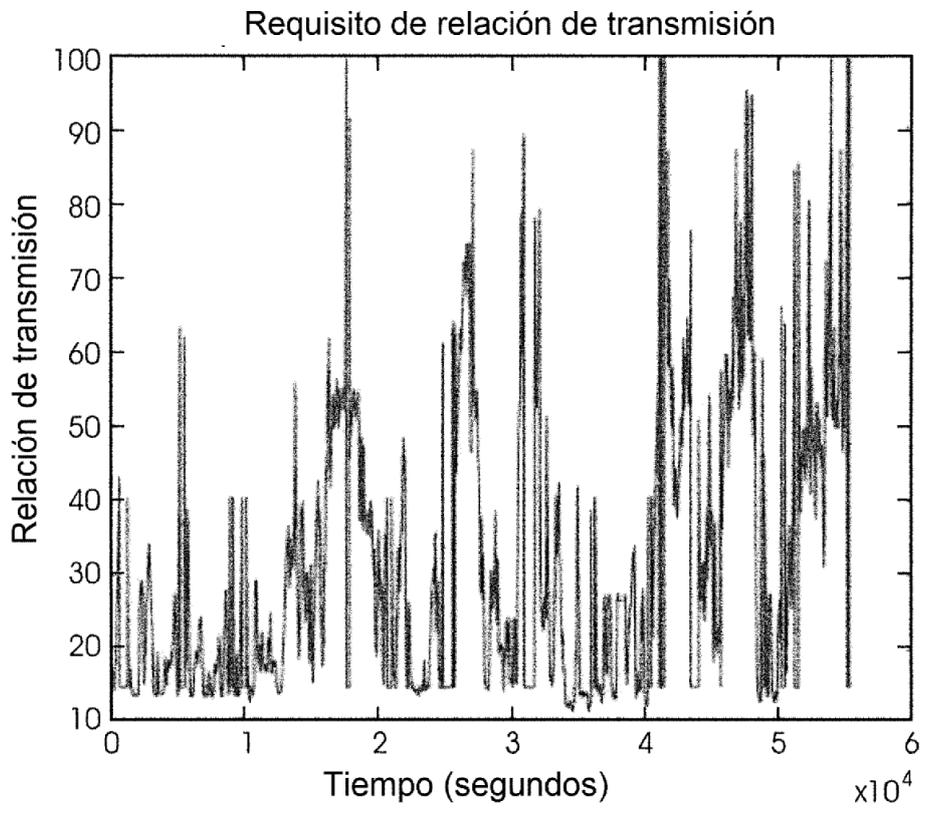


Fig. 11