

ANÁLISIS Y CORRECCIÓN DE LA ESTABILIDAD EN EL FERROCARRIL

Pedro Fraga López

*Departamento de Ingeniería Naval y O. e Ingeniería Mecánica.
Escuela Politécnica Superior. Universidad de La Coruña
C/ Mendizabal s/n. 15402-Ferrol (La Coruña).
E-mail: pfraga@cdf.udc.es*

RESUMEN

En este artículo se describe un posible modelo de estabilización de los ferrocarriles mediante la utilización del fenómeno giroscópico, con el fin de detectar el balanceo lateral que se produce durante el trazado de curvas o peraltes del tendido ferroviario. El equipo giroscópico diseñado se proyecta para ser sensible al ángulo de caída transversal de la estructura del ferrocarril y a la velocidad con que se desarrolla, de manera que a través de un sistema de corrección que utilice esta medida, se corrija este balanceo y se logre una plataforma horizontal permanente, evitando así el peligroso desplazamiento de la carga y la posibilidad de vuelco del vagón. El equipo ha de ser lo suficientemente simplificado para garantizar la viabilidad técnico-económica de su utilización.

1. INTRODUCCIÓN.

Los giróscopos utilizados normalmente en navegación aérea o marítima, disponen de tres grados de libertad, es decir, presentan tres ejes libres de rotación: uno alrededor de su eje de giro, el segundo alrededor de un eje transversal al primero, y el tercero alrededor del eje vertical, contenidos estos dos últimos en el plano del rotor, según corresponden en la figura-1 a las denominaciones O-E, C-D y A-B, respectivamente, con el

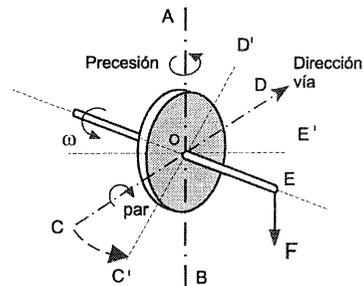
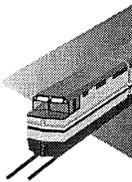


Figura-1. Grados de libertad



objeto de manifestar el fenómeno giroscópico en sus propiedades de inercia y precesión giroscópica en cualquier dirección.

En este artículo que se presenta, se trata precisamente de modelizar este fenómeno giroscópico en un sistema más simplificado, con el fin único de corregir el par que aparece en el transcurso de la circulación a través de superficies inclinadas, curvas o peraltes, y evitar así un balanceo excesivo que traiga consigo el vuelco o el corrimiento de la carga. Para ello, se partirá de la base de utilizar un giroscopo como el de la figura 1, en el que se implantan la condición de que el eje A-B sea fijo en posición vertical, siendo ω la velocidad de rotación del giroscopo = $d\phi/dt$ (rad/sg) y ϕ la posición angular de un punto del disco del giroscopo, medido desde el eje vertical y en el sentido de giro de éste.

Instalando el giroscopo con el eje de rotación O-E perpendicular a la dirección de la vía, cuando se aplica un fuerza F en E, o lo que es lo mismo, se produce un par alrededor del eje C-D, tal como tendría lugar en la inclinación que sufre el vagón durante el trazado de una curva o peralte, la precesión del giroscopo "T" se realizará alrededor del eje A-B, pasando el eje C-D a ser el C'-D' sin abandonar el plano horizontal y permaneciendo perpendicular a A-B.

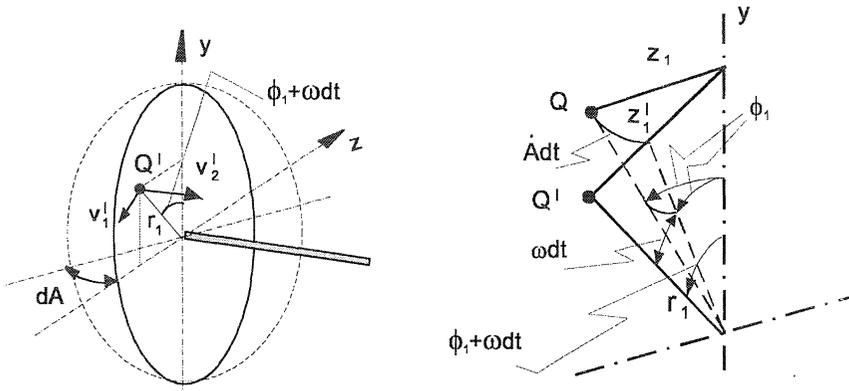


Figura-2. Precesión del giroscopo

Conforme con esta propiedad giroscópica, un elemento de masa diferencial m_1 del rotor, estará sometido a dos movimientos, uno debido a la propia rotación " ω " del giroscopo siguiendo la circunferencia de radio r_1 , y otro de precesión horizontal como consecuencia de su velocidad angular dA/dt . Ambos movimientos dan lugar entonces en ese punto a dos vectores de velocidad lineal, " v_1 " y " v_2 ", respectivamente, de forma que cuando se produce la precesión anunciada, en un intervalo de tiempo dt , el punto Q pasará a la posición Q' manteniéndose en la periferia del círculo de radio r_1 , el rotor girará un ángulo ωdt , ϕ_1 pasará a ser $(\phi_1 + \omega dt)$ y se modifican entonces ambas velocidades v_1



y v_2 respecto a la posición original del punto Q, según indican las figuras 2 y 3, pasando a v_1' y v_2' .

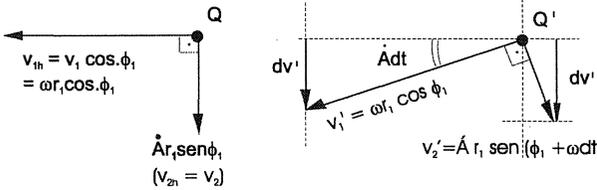


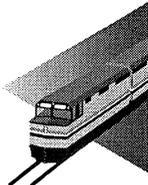
Figura-3. Componentes horizontales de la velocidad

Significa esto, que si se produce una alteración de la velocidad de la partícula m_1 , cuando precesiona el giróscopo, estaremos entonces en presencia de una aceleración, y por tanto esta partícula estará sometida a

una fuerza F, dando lugar al par de la precesión en el plano horizontal T que se obtiene en las ecuaciones 1 a 6:

$$z_1 = r_1 \text{ sen } \phi_1 \quad y_1 = r_1 \text{ cos } \phi_1 \tag{1}$$

$$v_1 = \omega r_1 \quad ; \quad v_2 = \dot{A} z_1 = \dot{A} r_1 \text{ sen } \phi_1$$



$$v_r = \omega r_1 = v_1 \tag{2}$$

$$v_{2'} = \dot{A} z_{r'} = \dot{A} r_1 \text{ sen}(\phi_1 + \omega dt)$$

$$dv' = (\omega r_1 \text{ cos } \phi_1) \dot{A} dt \tag{3}$$

$$dv'' = \frac{d(\dot{A} r_1 \text{ sen } \phi_1)}{d\phi_1} = \dot{A} r_1 \text{ cos } \phi_1 \epsilon$$

$$\frac{dv}{dt} = \omega r_1 \text{ cos } \phi_1 \dot{A} + \dot{A} r_1 \text{ cos } \phi_1 \frac{d\phi_1}{dt} = \omega r_1 \text{ cos } \phi_1 \dot{A} + \dot{A} r_1 \text{ cos } \phi_1 \omega = \tag{4}$$

$$= 2\dot{A} \omega r_1 \text{ cos } \phi_1 = 2\dot{A} \omega y_1$$

$$dF = m \frac{dv}{dt} = 2 m_1 \dot{A} \omega y_1 \quad ; \quad dT = dF y_1 = \tag{5}$$

$$T = \int \int_x dF y_1 dm = \int \int_x 2 m_1 \dot{A} \omega y_1^2 dm = 2\dot{A} \omega \int \int_x m \tag{6}$$

De acuerdo con esta última ecuación (6) del par de precesión T , para que éste tenga cierta magnitud es necesario que la velocidad de rotación ω del giróscopo sea alta; sin embargo, la velocidad de precesión es inversamente proporcional al valor de ω , y por tanto, cuanto mayor sea ω mas lenta es la velocidad de precesión, contraposición de efectos que será imprescindible tenerla en cuenta para que el giróscopo detecte el par producido, genere el orden de corrección, y la ejecute mediante los mecanismos dispuestos al efecto.

2. DETECCIÓN DEL BALANCE TRANSVERSAL.-

Que se produzca el ángulo de precesión "dA", en el plano horizontal que contiene al eje de rotación del giróscopo, proporciona la posibilidad de medir y traducir fácilmente el fenómeno físico indicado, mediante la instalación de un transformador diferencial en el extremo E de ese eje, según indica la figura 4, formando ese conjunto de giróscopo y transformador, el "transductor" buscado de la señal giroscópica.

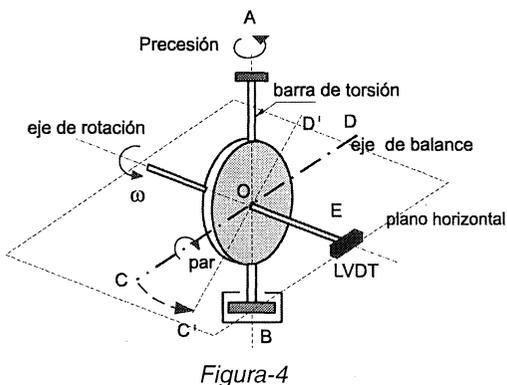


Figura-4

El sistema de estabilización que podría asociarse al ferrocarril, tendría entonces dos partes principales: una sería la que corresponde a la detección (giróscopo-transductor), cálculo y transmisión de señal, y otra la constituyen las unidades de accionamiento que materializan estas señales en la corrección del vuelco.

La señal obtenida por el giróscopo es tratada en el computador, y su valor resultante será la diferencia entre ésta y la posición real de la plataforma de la caja del vagón que debe realimentar el computador. Esta señal de situación real puede ser obtenida, como método sencillo, a través de una resistencia eléctrica variable en función de la horizontalidad de la plataforma.

La señal transmitida y amplificada en el servoamplificador, acciona el servomotor de la bomba de gasto variable que ha de disponerse en este sistema, y la regulación de éste, hace variar el caudal del fluido hidráulico en las dos direcciones independientes que ha de tener instaladas el mecanismo de la corrección, según indica la figura 5, corrigiendo así el balance lateral que se produce en el citado trazado de las curvas en función de la velocidad del ferrocarril.



GIRÓSCOPO ESTABILIZADOR Y MECANISMOS DE CORRECCIÓN

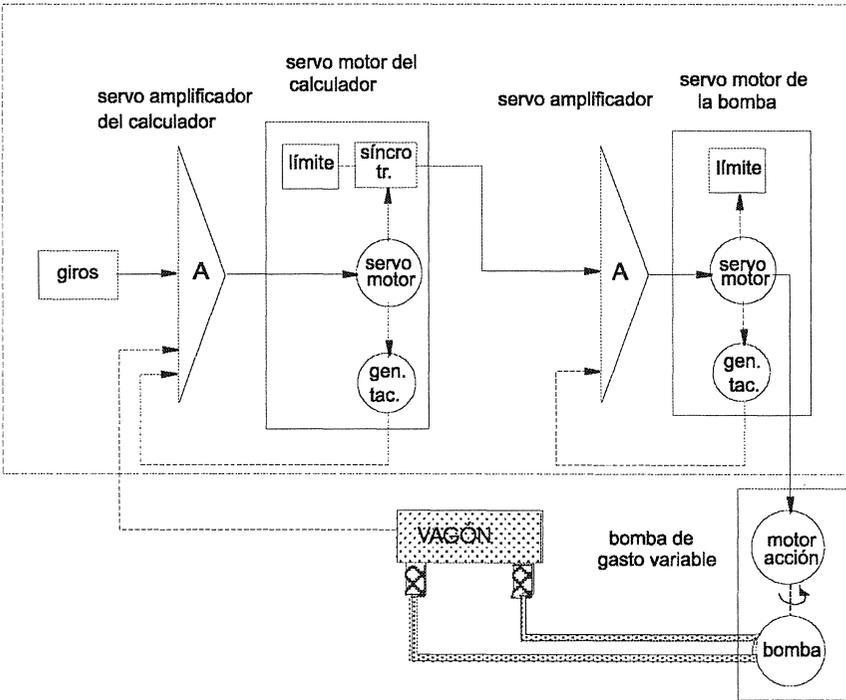


Figura-5

3. DISEÑO DEL CONTROL Y SEGUIMIENTO DE LA PRECESIÓN DEL GIRÓSCOPO.

Después de cada balance, será necesario recuperar la posición de plataforma horizontal para el giróscopo y deshacer el giro provocado por la precesión. Para ello, podría instalarse un sistema complejo de servomecanismos como el que utilizan las giroscópicas de navegación aérea o marítima; sin embargo, en aras de lograr una simplificación del sistema, y dado que en este caso la precesión provoca un ángulo contenido únicamente en el plano horizontal, esta recuperación puede conseguirse mediante la instalación de un giróscopo cuya sustentación vertical consistiera en la disposición que se indica en la figura 6.

Interesa especialmente que el giróscopo disponga de un soporte que no sea sensible a los desplazamientos en dirección vertical, como son los de su propio peso, y sobre todo, los posibles movimientos inerciales que en esa dirección le impriman las irregularidades del terreno. Como contrapartida, ha de comportarse como un sólido elástico perfecto a la torsión que le proporciona el par de precesión "T", es decir, ha de ser capaz de realizar con su deformación angular el seguimiento de la precesión, y recuperar posteriormente su posición original. Por consiguiente, la solución convencional de un resorte en el extremo superior y cojinete en el inferior no parece ser, en esta caso, la más adecuada para huir de la elección de servomecanismos que compliquen el sistema.

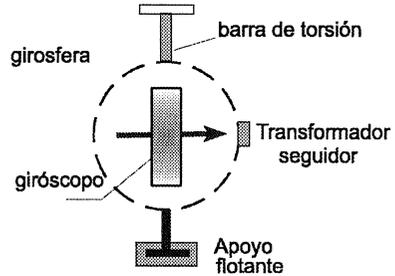


Figura-6. Sustentación de giroscopos

Se elige entonces, para el apoyo inferior, un disco de diámetro mucho mayor relativamente que su espesor, que ha de mantenerse en el interior de un fluido lubricante de cierta densidad. El objetivo de este tipo de apoyo, es que el empuje axial del eje vertical del giróscopo quede muy amortiguado, mientras que el desplazamiento angular en el plano horizontal tendrá todas las características contrarias.

El apoyo superior será rígido con un sistema de suspensión para la giroscopos que puede cumplir estas condiciones. Se elige entonces una barra de torsión de un material como el cobre-berilio laminado en frío. Este material dispone de un módulo de elasticidad "E" del orden de 100 GPa, un módulo de elasticidad transversal "G" del orden de 40 GPa, una tensión de fluencia a la tracción de 410 MPa y una tensión de fluencia a cortante de 250 Mpa.

Con un giróscopo de 3000 r.p.m., giroscopos de 140 mm de diámetro, recorrido del núcleo del transformador de seguimiento de 20 mm, ángulo "φ" de precesión horizontal = ángulo de torsión = 0,14 radianes, barra de torsión de longitud 80 mm. y sección circular de diámetro 5 mm se obtienen los siguientes resultados, teniendo en cuenta que la barra de torsión puede considerarse como un prisma de sección circular, empotrado en el extremo superior y libre en el inferior, de longitud "l", de forma que el ángulo máximo girado en el plano de precesión y la tensión máxima vienen dadas por las ecuaciones (7) y (8):

$$\varphi = 0,14 \text{ rad.} = \frac{M_T l}{G I_o} = \frac{M_T \cdot (8 \cdot 10^{-2}) [m]}{(40 \cdot 10^9) [N / m^2] \cdot \frac{\pi \cdot (2,5 \cdot 10^{-3})^4}{2} [m^4]} \text{ que implica } M_T = 4,29 \text{ N.m.} \quad (7)$$



$$\tau_{\max.} = \frac{M_T R}{I_o} = \frac{4,29[N.m] (2,5 \cdot 10^{-3})[m]}{\frac{\pi(2,5 \cdot 10^{-3})^4}{2} [m^4]} = 175 \text{ MPa.} \quad (8)$$

$$T = 2 I_z \omega \dot{A} = (4,29 \cdot 10^3) [N.mm] = 2 \frac{\pi(2,5)^4}{4} [mm^4] \frac{2\pi 3000}{60} [rad./sg] \dot{A} \quad (9)$$

$$\Rightarrow \dot{A} = 0,22 \text{ rad/s} = 12,61 \text{ grados/s} \quad \text{y} \quad t = \frac{0,14}{0,22} = 0,63 \text{ sg}$$

valor que es muy inferior a la tensión de fluencia a cortante de 250 MPa. para este material, elegido de cobre-berilio, quedando así garantizado el trabajo de la barra dentro del campo elástico.

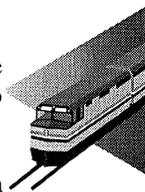
Por otro lado, este M_T ha de ser precisamente el momento torsor que produce el par de la precesión, que sustituido en la expresión obtenida para este movimiento, dará como resultado el valor indicado en la ecuación (9)

Se obtiene así una velocidad de precesión tal, que realiza el recorrido del núcleo del transformador de seguimiento en un tiempo de 0,63 sg (ecuación 9), aunque en realidad ha de emplear un tiempo algo mayor que el obtenido, debido a la amortiguación que le supone el lubricante del apoyo inferior.

4. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO Y ESTABILIZACIÓN.

El trazado de curvas, aunque no disponga de pendiente transversal a la vía, traerá consigo un par de vuelco cuyo eje de giro pasará por el centro de gravedad de la carga, que no ha de coincidir normalmente con el centro de gravedad del vagón. Consecuentemente, es necesario tener en cuenta y procesar también la velocidad del ferrocarril como parámetro relacionado directamente con la fuerza centrífuga que puede sufrir.

La más importante función a realizar, además del sistema citado de control del balance y su aceleración de caída en función del par de precesión detectado, es el cálculo del paso a abrir en la bomba de gasto variable que ha de regular el sistema corrector del balanceo transversal. Será necesario entonces intercalar entre el giróscopo de balance y el sistema de control de la bomba, que se indica en la figura 7, una unidad de procesamiento de



datos (CPU), en la que teniendo en cuenta la señal eléctrica obtenida en el giróscopo, como consecuencia del ángulo girado con la precesión, y la velocidad de la marcha, calcule la aceleración del balanceo y determine con estos datos el flujo y presión que ha de proporcionarse a cada parte del vagón.

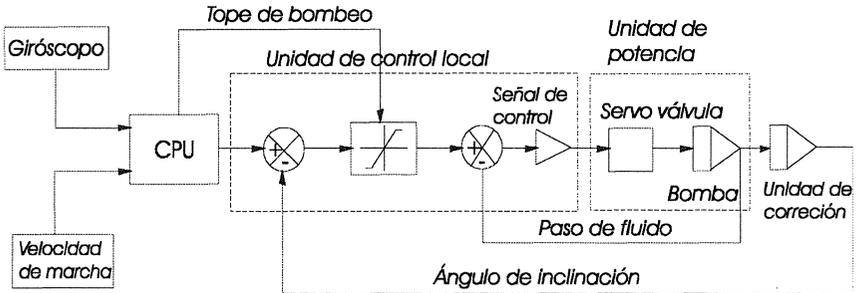


Figura-7. Diagrama de bloques del control integrado de señales

La unidad CPU, por tanto, genera las señales eléctricas necesarias para que otra unidad de control local (LCU) dirija los movimientos hidrodinámicos necesarios en la unidad de potencia hidráulica, obedeciendo a una secuencia como la que indica la figura 7.

La señal de control es generada en la LCU a partir de los cálculos realizados en la CPU, y se conecta a la servo-válvula que controla la alimentación de fluido de la bomba que accionará, según esta señal, mayor potencia hidráulica a un lado u otro del vagón. El tope

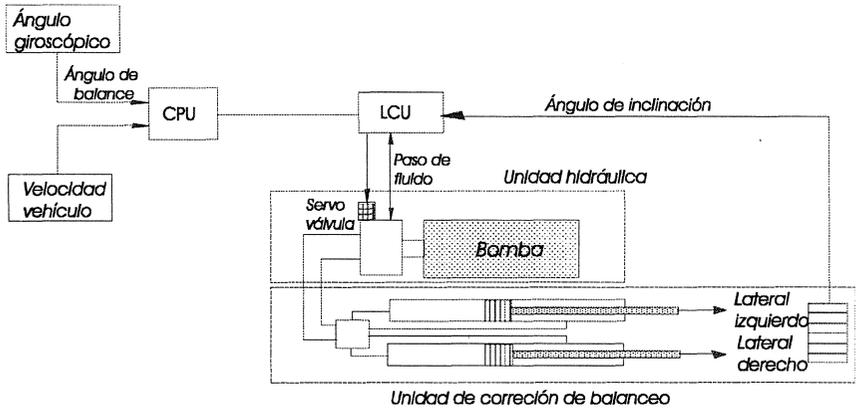


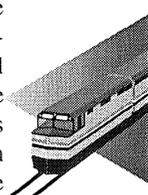
Figura-8. Esquema de actuación y control



de bombeo sería fácil de instalar mediante una señal eléctrica analógica que filtre la señal a la servo-válvula. Para la determinación de este tope, y el consiguiente ángulo de inclinación detectado para la corrección del balanceo, será siempre tenida en cuenta la velocidad del ferrocarril.

La razón para utilizar esta velocidad en el control anterior indicado es que el ángulo de inclinación a corregir no ha de ser idéntico al detectado por el giróscopo para todas las velocidades, sino que se reducirá a medida que la velocidad de ferrocarril sea mayor, puesto que el par requerido para deshacer la inclinación del vehículo es menor a velocidades mayores.

Después de calculado el ángulo requerido en la CPU, este ángulo es transmitido a la LCU mediante una señal analógica de voltaje. Esta señal es comparada con la actual posición de cada vagón y la diferencia entre ambos constituye el error de inclinación que ha de corregir la actuación de la bomba. La unidad de corrección de la inclinación proporcionará el ángulo de inclinación actual a través de un potenciómetro, y la diferencia con el calculado determinará la señal que actúa sobre la servo-válvula que controla el flujo de fluido a la bomba. Este flujo continúa mientras exista diferencia entre los dos ángulos citados, de acuerdo con un esquema de principio como el indicado en la figura 8, en donde existirá, además, un control de la señal calculada a través de la medida del flujo de fluido que ordena la servoválvula en cada caso, vigilando de este modo la proporcionalidad que debe existir con esa diferencia de ángulos citada.



5. CONCLUSIONES.

Este sistema tiene, por otro lado, la ventaja de que el conjunto de detección que constituye el giróscopo irá instalado en el interior del ferrocarril, a salvaguarda de las inclemencias del tiempo atmosférico y el entorno exterior, como son los golpes producidos por partículas o piedras de la vía, humedades, etc., lo cual le convierte en un sistema de gran robustez y fiabilidad; sin olvidar que resultará sensible a cualquier velocidad de caída lateral de la carrocería y/o velocidad del ferrocarril, lo cual no ocurre con otros transductores cuyo rango de frecuencias de respuesta lineal es limitada, particularmente en el espectro de bajas frecuencias de la oscilación.

6. REFERENCIAS.

□ Artículo:

Lara A., Verdaguer J. y Domingo J. "Giróscopos utilizados en sistemas de navegación inercial (I)", Mundo electrónico nº 152, pp 79-82 (1985).
"Giróscopos utilizados en sistemas de navegación inercial (II)", Mundo electrónico nº 158, pp 92-97 (1985).

Libro:

Sperry Marine System, USA. .”*MK 27 mod.1 gyrocompass operation and service manual*” Charlottesville - Virginia -EE.UU..1975).

Sperry Marine System, USA. “ *MK19 mod. 3C gyrocompass overhaul manual*” Charlottesville -Virginia -EE.UU.1982).

Sperry Marine System, USA “*MK 29 Heading and gyrocompass attitude unit manual.*” Charlottesville - Virginia -EE.UU.(1985).

 Libro:

Taylor P.L. “*Servomechanisms*”. Editorial Longmans (1982).

 Artículo:

Vinyolas J., Abete, J.M. and Giménez J.G. “*Design methodology and experimental results of a test facility for active and convencional railway suspensions*”. *Vehicle System Dynamics*, 22 pp 21-41 (1993).

