(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 566 048**

(21) Número de solicitud: 201630032

(51) Int. Cl.:

G01M 17/02 (2006.01)

(12) SOLICITUD DE PATENTE A1

(22) Fecha de presentación:

15.01.2016

(43) Fecha de publicación de la solicitud:

08.04.2016

(71) Solicitantes:

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID (100.0%)
Ramiro de Maeztu 7
28040 Madrid ES

(72) Inventor/es:

GUTIÉRREZ LÓPEZ, María Dolores y
GARCÍA DE JALÓN DE LA FUENTE, Javier

(74) Agente/Representante:

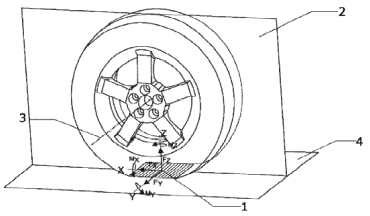
CARPINTERO LÓPEZ, Mario

(54) Título: **Método de medición de esfuerzos generados en el contacto entre el neumático y la calzada mediante la instrumentación de la llanta**

(57) Resumen:

Método de medición de esfuerzos generados en el contacto entre el neumático y la calzada mediante la instrumentación de la llanta.

Método de medición de los esfuerzos generados en el contacto entre el neumático y la calzada a partir de las deformaciones medidas por sensores de deformación distribuidos en dos circunferencias concéntricas con respecto al centro de la rueda. Dentro de cada circunferencia, se seleccionan al menos cuatro puntos espaciados ángulos equidistantes entre sí, denominados puntos de medida. Se debe obtener una señal por punto de medida, bien procedente de un sensor colocado directamente sobre dicho punto, o bien como resultado de la suma de las deformaciones medidas por dos sensores situados en puntos simétricos con respecto al plano que contiene al eje de la rueda y a la recta que une el centro de la rueda con el punto de medida. Las fuerzas y momentos en el contacto neumático-calzada se obtienen mediante la combinación lineal de las señales de deformación en los puntos de medida de la llanta con coeficientes que dependen de la posición angular de la rueda.



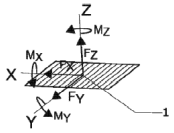


FIG. 1

ES 2 566 048 A1

DESCRIPCION

Método de medición de esfuerzos generados en el contacto entre el neumático y la calzada mediante la instrumentación de la llanta.

SECTOR TÉCNICO

La invención se encuadra dentro del sector de la dinámica de vehículos automóviles (turismos, camiones, autobuses y autocares, etc.), y más concretamente, en lo relativo a la medición de las fuerzas y momentos que se generan en el neumático como consecuencia de su interacción con la calzada.

ANTECEDENTES DE LA INVENCIÓN

Los neumáticos son los elementos del vehículo encargados de desarrollar y transmitir las fuerzas longitudinales de tracción y de frenado necesarias para propulsar y parar el vehículo respectivamente; de desarrollar las fuerzas laterales encargadas de conseguir el control y la estabilidad de la trayectoria; y de transmitir la fuerza vertical a la carretera y amortiguar las acciones dinámicas originadas por las irregularidades de la misma. Por ello, el conocimiento de dichas fuerzas es esencial para conocer el comportamiento dinámico del vehículo y mejorar su rendimiento.

El conocimiento de las fuerzas y momentos en el contacto entre el neumático y la calzada también es fundamental para mejorar la seguridad del vehículo, las características de maniobrabilidad y el confort. Unas medidas precisas de los esfuerzos en el contacto neumático-calzada permiten a los diseñadores de vehículos producir componentes más seguros, fiables, eficientes y duraderos. Además, los fabricantes de neumáticos también necesitan comparar las fuerzas generadas y transmitidas por diferentes modelos de neumáticos para determinar la construcción más adecuada para cada aplicación.

Asimismo, como los diseñadores de vehículos utilizan modelos matemáticos que representan la realidad de un modo simplificado, la obtención de medidas experimentales de los esfuerzos generados en el contacto neumático-calzada es necesaria para verificar la calidad de dichos modelos y comprobar si se ajustan a la realidad.

Por último, la obtención de medidas en tiempo real de las fuerzas generadas en el contacto neumático-calzada podría ser especialmente importante para la mejora del rendimiento de los sistemas de seguridad activa del vehículo, como el sistema anti-bloqueo de frenos (ABS), el sistema de control de tracción (TCS) o el programa de estabilidad electrónica (ESP). Dichos sistemas utilizan información sobre la dinámica del vehículo para detectar y minimizar el impacto de situaciones peligrosas posibles. Debido a razones tanto técnicas como económicas, su funcionamiento se basa en la estimación indirecta de las variables dinámicas del vehículo mediante la utilización de sensores a bordo. La medición directa de las fuerzas en el contacto neumático-calzada en vehículos en serie permitiría mejorar dichos sistemas de seguridad activa, ya que al no tener que ser estimadas indirectamente mediante procedimientos complejos, se podrían desarrollar estrategias de control más rápidas.

Las fuerzas y momentos generados en el contacto neumático-calzada se pueden medir mediante las denominadas ruedas dinamométricas. En el mercado existe una amplia variedad de ruedas dinamométricas, caracterizadas todas ellas por tener un coste muy elevado, pudiendo costar una única rueda más que el vehículo completo. Esto limita su uso exclusivo en vehículos de prueba para I+D, no siendo posible a día de hoy su utilización en vehículos en serie para proporcionar medidas de las fuerzas en el contacto neumático-calzada con el objetivo de mejorar el rendimiento de los sistemas de seguridad activa.

Generalmente, las ruedas dinamométricas comerciales están formadas por un transductor de fuerza de seis ejes, que es el componente encargado de medir las tres fuerzas y los tres momentos que se generan en el contacto neumático-calzada a partir de las medidas proporcionadas por un número determinado de galgas extensométricas (en el caso de transductores basados en el efecto piezorresistivo) o de sensores piezoeléctricos (en el caso de transductores basados en el efecto piezoeléctrico) colocados sobre el mismo. Un ejemplo de dichos transductores se puede encontrar en la patente US 6,038,933. El transductor, que es un elemento estándar, se debe poder utilizar en diferentes tipos de vehículos con independencia de cómo fuera la llanta original de éstos. Para poder adaptarse al tamaño del neumático del vehículo y al patrón de tornillos de la llanta original, las llantas dinamométricas están compuestas además por dos adaptadores, denominados "llanta modificada" y "adaptador al cubo", entre los cuales se coloca el transductor de fuerza. Una vez que la llanta modificada y el adaptador al cubo se unen al transductor, la llanta dinamométrica puede manejarse como una llanta normal.

Para medir las fuerzas y momentos que se generan en el contacto entre el neumático y la calzada, es necesario sustituir las llantas originales del vehículo por las llantas

dinamométricas descritas anteriormente. Sin embargo, dichas llantas dinamométricas tienen propiedades diferentes que las llantas originales del vehículo, es decir, tienen diferentes masas, inercias, rigideces. Como consecuencia, el comportamiento dinámico del vehículo se altera significativamente y las fuerzas en el contacto medidas por estas llantas no se corresponden con las fuerzas generadas en condiciones de funcionamiento reales.

Este hecho, junto con el elevado coste de las ruedas dinamométricas comerciales, justifica la necesidad de desarrollar nuevas alternativas de bajo coste que no alteren el comportamiento dinámico del vehículo y que puedan abrir la posibilidad de medir las fuerzas y momentos en el contacto neumático-calzada en vehículos en serie con el objetivo de mejorar el rendimiento de los sistemas de seguridad activa del vehículo.

Con este objetivo, se han desarrollado en los últimos años nuevos sistemas de medida basados en la instrumentación del neumático y de la llanta. Los sistemas basados en la instrumentación del neumático, denominados comúnmente “neumáticos inteligentes”, se encuentran en las primeras etapas de desarrollo, sin que existan en la actualidad productos en el mercado. Estos sistemas utilizan sensores tales como acelerómetros, sensores magnéticos, sensores ópticos o sensores de efecto Hall… embebidos en el neumático para medir los esfuerzos. Generalmente, dichos sistemas sólo permiten medir las fuerzas cada vez que los sensores se encuentran en una determinada posición angular (normalmente, cuando pasan por la huella de contacto). Ello conlleva que los esfuerzos sólo se puedan medir una vez por vuelta, teniendo que cambiar la frecuencia de muestreo en función de la velocidad angular de la rueda.

Por otro lado, la instrumentación de la llanta en lugar del neumático para la medición de los esfuerzos en el contacto neumático-calzada es especialmente ventajosa porque la primera es más sencilla de manipular y es un componente con un menor desgaste que el segundo. Además, la colocación de sensores embebidos en el neumático puede producir un desgaste mayor y más irregular del mismo.

Entre los sistemas basados en la instrumentación de la llanta se puede destacar la invención objeto de la patente ES 201130287. Dicha invención consiste en un método y un sistema que permite la medición de las fuerzas y momentos que aparecen en el contacto entre el neumático y la calzada a partir de las deformaciones medidas en diferentes puntos de la llanta sobre la que se monta dicho neumático. Para ello, los sensores que miden la deformación en la llanta (como son las galgas extensométricas) se colocan de modo que

queden agrupados en al menos tres circunferencias de medida. Dentro de cada circunferencia, los sensores se colocan en al menos 5 puntos distribuidos en posiciones angulares equidistantes.

Las deformaciones medidas varían de forma periódica con el cambio de la posición angular de la rueda. Con el objetivo de obtener las fuerzas y momentos que aparecen en el contacto neumático-calzada, las señales de deformación de cada circunferencia se combinan entre sí de modo que se obtengan una serie de señales intermedias (denominadas en la patente ES 201130287 E_{iS}, E_{iA} y E'_{iA}). Aunque dichas señales intermedias pueden tener cierto rizado que varíe con la posición angular, se supone que éste es despreciable en comparación con la componente continua, y por lo tanto dichas señales se suponen como independientes de la posición angular de la rueda. Finalmente, los esfuerzos M_X, F_Y y F_Z se obtienen a partir de las señales E_{iS} calculadas en al menos tres circunferencias y los esfuerzos F_X, M_Y y M_Z se obtienen a partir de las señales E_{iA} y E'_{iA} calculadas en al menos dos y una circunferencia respectivamente resolviendo dos sistemas de ecuaciones lineales cuyas matrices de coeficientes son constantes.

Para hallar las señales intermedias E_{iS}, E_{iA} y E'_{iA} en la patente ES 201130287 se parte de la suposición de que en la descomposición en series de Fourier de las señales de deformación generadas por los esfuerzos M_X, F_Y y F_Z sólo aparecen términos en coseno, mientras que en el caso de los esfuerzos F_X, M_Y y M_Z, sólo aparecen términos en seno. Sin embargo dicha suposición es únicamente válida en el caso en el que los sensores se hayan colocado en puntos de la llanta que se encuentren contenidos en planos de simetría de la misma. Sin embargo, si los puntos en los que se sitúan los sensores no están contenidos en planos de simetría, pueden aparecer términos en seno en las señales de deformación generadas por M_X, F_Y y F_Z y términos en coseno en las señales generadas por F_X, M_Y y M_Z, aunque de menor amplitud que los anteriores.

Existen llantas que no permiten, por su geometría, colocar los sensores contenidos en planos de simetría de la misma, ya que no tienen varios planos de simetría separados ángulos equidistantes entre sí (como ocurre por ejemplo en el caso de llantas con distinto número de radios que de tornillos). Además, aunque teóricamente se puedan pegar los sensores en planos de simetría de la llanta, el pegado de las galgas extensométricas es manual y por tanto no es posible colocarlas exactamente en los puntos requeridos en la práctica. En estos casos, la amplitud del rizado de las señales intermedias E_{iS}, E_{iA} y E'_{iA} puede ser elevada y si estas se suponen independientes de la posición angular de la rueda, los errores en la medición de los esfuerzos son también elevados, ya que dependen de la

amplitud de este rizado. Por otro lado, la invención de la patente ES 201130287 supone que dos sensores de la misma circunferencia miden lo mismo cuando la rueda ha girado el ángulo que los separa. Sin embargo, es común que en la práctica esto no ocurra si, entre otras posibles causas, existen defectos en la fabricación de la llanta o errores en el pegado de las galgas. Además esto no ocurre nunca cuando todos los sensores no se colocan en planos de simetría del mismo tipo de la llanta. Este hecho provoca también que el rizado en las señales intermedias E_{iS}, E_{iA} y E'_{iA} sea mucho mayor y que por tanto el error en la medida de los esfuerzos sea más elevado.

En la presente invención se resuelven todos estos inconvenientes contemplando la posibilidad de que las señales intermedias tengan un rizado no despreciable y que por tanto no sean independientes de la posición angular de la rueda. Teniendo en cuenta esto, además de las combinaciones de señales realizadas dentro de cada circunferencia, se realizan combinaciones adicionales de señales provenientes de diferentes circunferencias con coeficientes que dependen de la posición angular de la rueda obtenidos mediante calibración para hallar los esfuerzos en el contacto neumático-calzada. Gracias a dicha combinación de señales provenientes de diferentes circunferencias se consigue eliminar este rizado.

Además, el rizado de las señales intermedias E_{iS}, E_{iA} y E'_{iA} depende del número de sensores utilizados en la circunferencia. Por ello, en la invención ES 201130287 se proponía que el número de sensores a utilizar en cada circunferencia se eligiera de modo que el rizado (determinado por la amplitud de los armónicos no eliminados) de dichas señales fuera despreciable. Sin embargo, como en la presente invención el rizado de dichas señales se puede eliminar combinando señales provenientes de diferentes circunferencias, se puede reducir el número de sensores que se utilicen en cada circunferencia.

Por otro lado, en una determinada posición angular de la llanta, no es posible encontrar dos puntos en los que el primer armónico de las señales de deformación generadas por el esfuerzo M_X no sea proporcional al primer armónico de las señales de deformación generadas por el esfuerzo F_Y. Por lo tanto, no es posible calcular los esfuerzos M_X y F_Y utilizando únicamente señales dependientes del primer armónico de las señales de deformación, tal y como se propone en la patente ES 201130287 (denominadas E_{iS} en dicha patente). En la presente invención se soluciona este problema calculando en al menos una de las circunferencias una señal intermedia dependiente del segundo armónico.

Además, si se calcula esta nueva señal dependiente del segundo armónico, ya no es necesario obtener tres señales del tipo E_{iS} como en la invención de la patente ES

201130287, sino que con dos es suficiente. Como ya no es necesario obtener una señal del tipo E_{iS} en al menos tres circunferencias, se puede reducir el número de circunferencias a utilizar en la llanta y distribuir los sensores en únicamente dos circunferencias.

Por último, en la presente invención se contempla la posibilidad de utilizar pares de sensores espaciados ángulos equidistantes entre sí, además de la posibilidad de que se utilicen sensores únicos espaciados ángulos equidistantes entre sí. Se tomará una única señal por cada par de sensores, de modo que sea igual a la suma de las señales de deformación en los puntos en los que se encuentran los sensores del par, los cuales son simétricos con respecto a un mismo plano. Dicha posibilidad es especialmente útil en el caso de llantas con radios dobles para aprovechar las condiciones de simetría de las mismas.

En suma, en la presente invención se propone un método de medición de los esfuerzos en el contacto neumático-calzada que permite por un lado reducir el número de sensores que se deben utilizar en la llanta (mientras que en la invención de la patente ES 201130287 es necesario utilizar al menos tres circunferencias con un mínimo de cinco sensores cada una, en la presente invención se deben utilizar dos circunferencias que tengan como mínimo cuatro sensores cada una de ellas) y por otro, reducir el error en la medición de los esfuerzos en el contacto neumático-calzada. Esta reducción del error ocurre especialmente en el caso de llantas con diferente número de radios y de tornillos y en el caso de llantas con radios dobles. Además el error se reduce significativamente porque esta invención es capaz de corregir los errores en el posicionado de las galgas extensométricas en cualquier tipo de llanta.

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCIÓN

La presente invención se basa en la medida de las tres componentes de la fuerza (F_X, F_Y y F_Z) y de las tres componentes del momento (M_X, M_Y y M_Z) que actúan sobre el neumático como consecuencia de su interacción con la calzada. El sistema de referencia utilizado para definir las fuerzas F_X, F_Y y F_Z y los momentos M_X, M_Y y M_Z es el especificado en la FIG. 1. El origen del sistema de referencia coincide con el punto teórico de contacto (referencia 1), definido como el punto de intersección del plano medio de la rueda (referencia 2) y la proyección de su eje de rotación (referencia 3) sobre la superficie de rodadura (referencia 4). El eje X es aquel definido por la recta de intersección del plano medio de la rueda y el plano de la superficie de rodadura, con sentido positivo coincidente con el avance del vehículo. El eje Z es el eje perpendicular al plano de la superficie de rodadura, con sentido opuesto a la

aceleración de la gravedad. El eje *Y* es el eje perpendicular a los anteriores, cuyo sentido viene determinado por la regla de la mano derecha.

Las fuerzas y momentos que aparecen en el contacto neumático-calzada se obtienen a partir de las señales de deformación medidas en diferentes puntos de la llanta mediante sensores apropiados, que pueden ser, por ejemplo, galgas extensométricas. Dichos sensores se pueden colocar de modo que midan las deformaciones unitarias en cualquier dirección, aunque preferiblemente se colocarán de modo que midan las deformaciones en dirección radial. Como ejemplo, en la FIG. 4 los sensores (referencia 10) se han colocado en la llanta de modo que la deformación se mida en dirección radial, mientras que en la FIG. 5 (referencia 10) se han colocado de modo que midan la deformación en dirección circunferencial. Los sensores se pueden colocar en la parte exterior (referencia 5 de la FIG. 2) o en la parte interior (referencia 6 de la FIG. 2) de la llanta, así como en los laterales de los radios (referencia 7 de la FIG. 2) según convenga, siguiendo los criterios que se exponen a continuación.

Los sensores se deben colocar en la llanta de modo que queden agrupados en dos circunferencias concéntricas con respecto al centro de la misma, tal y como se muestra en la FIG. 4 con la referencia 9. Por tanto, todos los sensores situados en la misma circunferencia se encuentran a la misma distancia radial del centro de la rueda. No es necesario que ambas circunferencias se encuentre en la misma parte de la llanta (como se muestra en la FIG. 4, en la que ambas circunferencias se han colocado en la parte exterior, y en la FIG. 6, en la que las dos circunferencias están situadas en la parte interior), sino que es posible colocar una de ellas en la parte interior, mientras que la otra se puede emplazar en la parte exterior. Por ejemplo, en la FIG. 7 se muestran dos imágenes de la misma rueda. La imagen superior de la figura muestra la parte exterior de la llanta, en la que se ha colocado la circunferencia de menor diámetro, mientras que la imagen inferior de la figura muestra la parte interior de la llanta, en la que se ha colocado la circunferencia de mayor diámetro. También es posible que los sensores de una o ambas circunferencias se coloquen en los laterales de la llanta. Dichas circunferencias se denotarán con el subíndice *i* y se numerarán desde el centro de la rueda hacia afuera.

En cada circunferencia es necesario seleccionar un número de puntos igual o mayor que cuatro espaciados ángulos equidistantes entre sí. A estos puntos, representados en las FIGS. 4-11 y en las FIGS. 13-16 con un aspa (x), se les denominará "puntos de medida" (referencia 8 en dichas figuras). De aquí en adelante, el número de puntos de medida

seleccionados en la circunferencia *i* se denotará como N_{Pi}. Dentro de cada circunferencia *i*, los puntos de medida se denotarán con el subíndice *j* y se numerarán en sentido contrario a las agujas del reloj a partir de un punto de medida tomado como referencia.

Los sensores (referencia 10) se colocarán en la circunferencia tomando como referencia estos puntos de medida según alguna de las dos opciones siguientes:

- *Opción 1*: Los sensores se colocan directamente en los puntos de medida. Para poder seguir esta opción, es necesario que los puntos de medida se encuentren en la superficie interior o exterior de la llanta o en los laterales de los radios de la misma. Por ejemplo, en la primera circunferencia (la de menor diámetro) de la llanta de la imagen superior de la FIG. 8 y en la primera circunferencia de la llanta del centro de dicha figura, los sensores se han colocado según esta opción.
- *Opción 2*: En este caso los sensores no se colocan directamente sobre los puntos de medida. En cambio, se deben colocar dos sensores por cada punto de medida, de modo que se sitúen en puntos simétricos con respecto al plano (referencia 11 de la FIG. 9) que contiene al eje de rotación la rueda (referencia 3 de la FIG. 9) y a la recta (referencia 12 de la FIG. 9) que une el centro de la rueda (referencia 13 de la FIG. 9) con dicho punto de medida (referencia 8 de la FIG. 9). A estos planos (referencia 11 de la FIG. 9) se les denominará "planos de medida". Como cada plano de medida va asociado a un punto de medida en concreto, los planos de medida se denotarán con el mismo índice (*j*) que los puntos de medida y les corresponderá la misma numeración dentro de la circunferencia que la que les corresponda a los puntos de medida a los que van asociados. En este caso, no es necesario que los puntos de medida se encuentren sobre la superficie de la llanta. Por el contrario, es suficiente con que se puedan encontrar puntos simétricos con respecto a los planos definidos por los puntos de medida que sí se encuentren sobre la superficie de la llanta. Por ejemplo, en la segunda circunferencia (la de mayor diámetro) de la llanta superior y de la llanta del centro, así como en ambas circunferencias de la llanta inferior de la FIG. 8, los sensores se han colocado siguiendo esta opción. En la llanta superior, los puntos de medida están en la superficie de la llanta, mientras que en la llanta del centro y en la inferior los puntos de medida no se encuentran sobre la superficie de la llanta.

Es necesario seguir la misma opción en todos los puntos de medida de la misma circunferencia. Sin embargo, no es necesario que el número de puntos de medida seleccionados en ambas circunferencias sea igual ni que las posiciones angulares de los puntos de medida coincidan en las dos circunferencias. Tampoco es necesario utilizar la misma opción en las dos circunferencias. Por ejemplo, en la primera circunferencia (la de menor diámetro) de la llanta de la FIG. 10 se han utilizado cuatro puntos de medida para situar en ellos cuatro sensores siguiendo la *opción 1*, mientras que en la segunda circunferencia de dicha llanta se han seleccionado ocho puntos de medida en los que se han colocado ocho sensores de acuerdo con la *opción 1*. Por otro lado, en las llantas de la imagen superior y de la imagen del centro de la FIG. 11 se ha utilizado el mismo número de puntos de medida situados en las mismas posiciones angulares en las dos circunferencias. Sin embargo, en la imagen inferior de dicha figura los puntos de medida de la primera circunferencia están situados en diferentes posiciones angulares que los de la segunda circunferencia.

Las fuerzas (F_X, F_Y y F_Z) y momentos (M_X, M_Y y M_Z) generados en el contacto neumático-calzada se obtienen siguiendo los siguientes pasos:

- *Paso 1*: Se obtiene una señal de deformación por cada punto de medida *j* de la circunferencia *i*, es decir, se obtiene un total de N_{Pi} señales de deformación en cada circunferencia *i*. Si los sensores se han colocado según la *opción 1*, las N_{Pi} señales de deformación se corresponden con las generadas en los puntos de medida. Para obtener dichas señales, los sensores se tendrán que conectar utilizando un circuito apropiado como puede ser por ejemplo, ¼ de puente de Wheatstone (imagen superior de la FIG. 12). Por el contrario, si la circunferencia se ha instrumentado siguiendo la *opción 2*, cada señal *j* de la circunferencia *i* se corresponde con la suma de las deformaciones generadas en los dos puntos en los que se han colocado los sensores del par correspondiente al punto de medida *j*. Dicha suma se puede realizar analógicamente, mediante la conexión de los sensores en un circuito apropiado, como por ejemplo mediante la conexión de las galgas extensométricas en ½ puente de Wheatstone, tal y como se muestra en la imagen inferior de la FIG. 12. Del mismo modo, también es posible conectar cada uno de los sensores del par en ¼ de puente de Wheatstone (imagen superior de la FIG. 12) y realizar la suma digitalmente mediante el uso de un microcontrolador. Dichas señales dependen del ángulo girado por la rueda.

– *Paso 2*: Las señales de deformación medidas en ambas circunferencias se combinan linealmente para obtener las fuerzas y momentos que aparecen en el contacto entre el neumático y la calzada mediante coeficientes cuyos valores dependen de la posición angular de la rueda. Los coeficientes dependen también de la posición angular de los puntos de medida y/o de los diámetros de las circunferencias seleccionadas y de la rueda que se va a instrumentar. Los coeficientes que sean característicos de la llanta y de las circunferencias seleccionadas, deben obtenerse mediante calibración.

En suma, es objeto de la presente invención un método de medida de las fuerzas y momentos generados por el contacto del neumático con la calzada. Dichos esfuerzos se obtienen a partir de las señales de deformación medidas en una pluralidad de puntos de la llanta que monta el neumático mediante una pluralidad de sensores de deformación. Los sensores están distribuidos en dos circunferencias concéntricas con respecto al centro de la llanta. Para colocar los sensores en cada una de las circunferencias, es necesario en primer lugar seleccionar al menos cuatro puntos de medida espaciados ángulos equidistantes entre sí de modo que la geometría de la llanta permita colocar los sensores directamente en dichos puntos (siguiendo la *opción 1*) o en puntos simétricos con respecto al plano que contiene al eje de rotación de la rueda y a la recta que une el centro de la rueda con el punto de medida (siguiendo la *opción 2*). En un primer paso, se obtienen N_{Pi} señales de deformación por circunferencia. Dichas señales se corresponden con las deformaciones en los puntos en los que se han colocado los sensores (si los sensores se han colocado de acuerdo con la *opción 1*) o bien cada una de las N_{Pi} señales es la suma de las deformaciones en los puntos en los que se colocan los sensores de cada par (si los sensores se han colocado siguiendo la *opción 2*). En un segundo paso se obtienen los esfuerzos en el contacto neumático-calzada mediante la combinación lineal de las señales obtenidas en las dos circunferencias con coeficientes que dependen de la posición angular de la rueda, de la posición angular de los puntos de medida y/o de los diámetros de las circunferencias seleccionadas y de la rueda que se va a instrumentar.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

La FIG. 1 muestra las fuerzas y momentos que actúan sobre el neumático como consecuencia de su interacción con la calzada. Dichas fuerzas y momentos se han definido según el sistema de referencia indicado en la figura. Esta figura muestra también el punto teórico de contacto (1), el plano medio de la rueda (2), que es ortogonal al eje de rotación de la misma (3) y la superficie de rodadura (4).

La FIG. 2 muestra una rueda con cinco radios. En dicha figura se muestra la parte exterior (5) y la parte interior (6) de la llanta, así como los laterales de los radios (7) para ilustrar que los sensores se pueden colocar en cualquiera de esas partes.

La FIG. 3 muestra los planos de simetría (14) de una rueda de cinco radios. En la parte superior de la figura se muestra una imagen en tres dimensiones de la rueda de cinco radios. En dicha imagen se puede observar uno de los planos de simetría, que divide a la rueda en dos mitades simétricas con respecto a sí mismo. Dicho plano coincide con el plano medio de uno de los radios de la llanta. Esta rueda tiene un total de cinco planos de simetría como el que se muestra en la imagen superior de la figura, espaciados 72º entre sí, y que coinciden con los planos medios de cada uno de los radios. Todos estos planos de simetría se han señalado con líneas discontinuas en la imagen en dos dimensiones de la rueda de cinco radios que se muestra en la parte inferior de la figura.

La FIG. 4 muestra una rueda con cinco radios. Dicha rueda tiene cinco planos de simetría (14) espaciados 72º entre sí. En la llanta se han colocado diez sensores (10) en dirección radial agrupados en dos circunferencias concéntricas (9) situadas en la parte exterior de la llanta. Los sensores se han colocado directamente sobre los puntos de medida (8) seleccionados en cada circunferencia siguiendo la *opción 1*. Los puntos de medida coinciden con puntos de intersección entre las circunferencias y los cinco planos de simetría de la llanta.

La FIG. 5 muestra una rueda con cinco radios. Dicha rueda tiene cinco planos de simetría (14) espaciados 72º entre sí. En la llanta se han colocado diez sensores (10) en dirección circunferencial agrupados en dos circunferencias concéntricas (9) situadas en la parte exterior de la llanta. Los sensores se han colocado directamente sobre los puntos de medida (8) seleccionados en cada circunferencia siguiendo la *opción 1*. Los puntos de medida coinciden con puntos de intersección entre las circunferencias y los cinco planos de simetría de la llanta.

La FIG. 6 muestra una rueda con cinco radios. Dicha rueda tiene cinco planos de simetría (14) espaciados 72º entre sí. En la llanta se han colocado diez sensores (10) en dirección radial agrupados en dos circunferencias concéntricas (9) situadas en la parte interior de la llanta. Los sensores se han colocado directamente sobre los puntos de medida (8) seleccionados en cada circunferencia siguiendo la *opción 1*. Los puntos de medida coinciden con puntos de intersección entre las circunferencias y los cinco planos de simetría de la llanta.

La FIG. 7 muestra una rueda con cinco radios. Dicha rueda tiene cinco planos de simetría (14) espaciados 72º entre sí. En la llanta se han colocado diez sensores (10) en dirección radial agrupados en dos circunferencias concéntricas (9). La circunferencia de menor diámetro se ha colocado en la parte exterior de la llanta mientras que la circunferencia de mayor diámetro se encuentra en la parte interior de llanta. Los sensores se han colocado directamente sobre los puntos de medida (8) seleccionados en cada circunferencia siguiendo la *opción 1*. Los puntos de medida coinciden con puntos de intersección entre las circunferencias y los cinco planos de simetría de la llanta.

La FIG. 8 muestra tres ruedas con tres tipos de llanta diferentes. Las tres llantas tienen cinco planos de simetría (14) espaciados 72º entre sí. En todas ellas, se han seleccionado cinco puntos de medida (8) espaciados 72º entre sí en cada una de las dos circunferencias (9), de modo que estos coincidan con puntos de intersección entre la circunferencia y los planos de simetría de la llanta. En la llanta de la imagen superior de la figura, los puntos de medida de ambas circunferencias se encuentran sobre la superficie exterior de la llanta. En este caso, los sensores (10) se han colocado en la primera circunferencia directamente sobre los puntos de medida siguiendo la *opción 1*. Sin embargo en la segunda circunferencia, se han colocado cinco pares de sensores (10) según la *opción 2*. Los dos sensores de cada par se sitúan en puntos simétricos con respecto a uno de los planos de simetría de la llanta. En la llanta de la imagen del centro, los puntos de medida de la primera circunferencia se encuentran sobre la superficie exterior de la llanta y los sensores se han colocado directamente sobre ellos según la opción *1*. Sin embargo, los puntos de medida de la segunda circunferencia no se encuentran sobre la superficie de la llanta, por lo que sólo es posible colocar cinco pares de sensores de acuerdo con la *opción 2*. En la llanta de la imagen inferior de la figura los puntos de medida de ambas circunferencias no se encuentran sobre la superficie de la llanta y en cada una de ellas se han colocado cinco pares de sensores según la *opción 2*.

La FIG. 9 muestra un par de sensores (10) colocados en una circunferencia (9) según la *opción 2*. Los sensores están situados en puntos simétricos con respecto al plano (11) que contiene al eje de la rueda (3) y a la recta (12) que une el centro de la rueda (13) con el punto de medida (8), denominado plano de medida.

La FIG. 10 muestra una rueda de autobús. Dicha rueda tiene dos posibles tipos de planos de simetría. En la imagen de esta figura se muestran cuatro planos de simetría (14) espaciados 45º entre sí del mismo tipo. En la llanta se han colocado doce sensores (10) en dirección radial agrupados en dos circunferencias concéntricas (9). En la primera

circunferencia se han seleccionado cuatro puntos de medida (8) que coinciden con los cuatro puntos de intersección entre los planos de simetría vertical y horizontal y la circunferencia. En la segunda circunferencia se han seleccionado ocho puntos de medida que coinciden con los puntos de intersección entre todos los planos de simetría representados en la imagen y la circunferencia. Los sensores se han colocado directamente sobre los puntos de medida en ambas circunferencias siguiendo la *opción 1*.

La FIG. 11 muestra tres imágenes de la misma rueda de autobús. Esta rueda tiene dos tipos de planos de simetría. En la imagen superior se muestran los planos de simetría (14) de uno de los tipos. En dicha imagen, los puntos de medida (8) se han seleccionado de modo que coincidan con los puntos de intersección entre estos planos de simetría y las circunferencias (9). En la imagen del centro se muestran los planos de simetría (14) correspondientes al otro tipo. En esta imagen, los puntos de medida (8) coinciden con los puntos de intersección entre los planos de simetría de este segundo tipo y las circunferencias (9). Por último, en la imagen inferior se muestran todos los planos de simetría de la llanta. En la primera circunferencia de la llanta de esta imagen, se han seleccionado como puntos de medida los puntos de intersección entre los planos de simetría del primer tipo mencionado (es decir, los planos mostrados en la imagen superior) y dicha circunferencia, mientras que en la segunda circunferencia los puntos de medida son aquellos que resultan de la intersección entre dicha circunferencia y los planos de simetría del segundo tipo (es decir, los planos mostrados en la imagen del centro). En las tres imágenes, los sensores (10) se han colocado directamente sobre los puntos de medida según la *opción 1*.

La FIG. 12 muestra en la imagen superior el circuito correspondiente a 1/4 Puente de Wheatstone, mientras que en la imagen inferior se encuentra el circuito correspondiente a 1/2 Puente de Wheatstone. En dichas figuras, V_{in} es la tensión de alimentación del circuito, V_{cr} es la tensión de salida, R_{cr} (en el circuito 1/4 Puente de Wheatstone), R_{cr1} y R_{cr2} (en el circuito de 1/2 Puente de Wheatstone) son las resistencias de la galgas extensométricas y R_g se corresponde con las resistencias no activas de los circuitos.

La FIG. 13 muestra una rueda con seis radios y cuatro agujeros para los tornillos. Dicha llanta tiene un único plano de simetría (14) del mismo tipo. En la rueda se han colocado doce sensores (10) en dirección radial agrupados en dos circunferencias concéntricas (9) situadas en la parte exterior de la llanta. Los sensores se han colocado directamente sobre los puntos de medida (8) seleccionados en cada circunferencia siguiendo la *opción 1*. Sólo dos puntos de medida de cada circunferencia coinciden con puntos de intersección entre la circunferencia y el plano de simetría.

La FIG. 14 muestra una rueda con cinco radios y cuatro agujeros para los tornillos. Dicha rueda tiene un único plano de simetría (14) del mismo tipo. En la llanta se han colocado diez sensores (10) en dirección radial agrupados en dos circunferencias concéntricas (9) situadas en la parte exterior de la llanta. Los sensores se han colocado directamente sobre los puntos de medida (8) seleccionados en cada circunferencia siguiendo la *opción 1*. Sólo un punto de medida de cada circunferencia coincide con el punto de intersección entre la circunferencia y el plano de simetría.

La FIG. 15 muestra la definición de las coordenadas angulares. La imagen superior muestra las coordenadas angulares definidas para la primera circunferencia mientras que la imagen inferior muestra las coordenadas angulares referentes a la segunda circunferencia. α_i es el ángulo entre el plano de medida de referencia (16) de la circunferencia *i* (9) y el plano de aplicación de los esfuerzos (15). $\beta_{i,j}$ es el ángulo entre el plano de medida *j* (11) y el plano de medida de referencia de la circunferencia *i* (16). $\gamma_{i,j}$ es el ángulo entre el plano de medida *j* (11) y el plano de aplicación de los esfuerzos (15). Finalmente, θ es el ángulo entre un plano de referencia de la rueda (17) y el plano de aplicación de los esfuerzos (15).

La FIG. 16 muestra una rueda con diez radios y cinco agujeros para los tornillos. Dicha rueda tiene cinco planos de simetría (14) espaciados 72º entre sí. En la llanta se han colocado diez sensores (10) en dirección radial agrupados en dos circunferencias concéntricas (9) situadas en la parte exterior de la llanta. Los sensores se han colocado directamente sobre los puntos de medida (8) seleccionados en cada circunferencia siguiendo la *opción 1*. En este caso los puntos de medida no coinciden con puntos de intersección entre los planos de simetría y las circunferencias.

La FIG. 17 muestra las medidas tomadas del esfuerzo F_Z y de las deformaciones cuando la rueda de la FIG. 16 se encuentra en la posición angular $\theta = 0^{\circ}$, para hallar el valor de las funciones de influencia de F_Z sobre las deformaciones en esa posición angular, $a_{i,j}^{f_3}(0^{\circ})$. La imagen superior muestra cómo el esfuerzo F_Z se ha aplicado en cuatro escalones que van desde los 3000 N hasta los 6000 N aproximadamente. La imagen inferior muestra las deformaciones en todos los puntos de medida de las dos circunferencias durante la aplicación de dichos escalones de fuerza cuando la rueda se encuentra en la posición $\theta = 0^{\circ}$.

La FIG. 18 muestra los valores de las funciones de influencia de F_Z sobre las deformaciones generadas en todos los puntos de medida de la llanta de diez radios de la FIG. 16, $a_{i,j}^{f_3}(\theta)$,

durante un giro completo de la rueda. La imagen de la izquierda muestra las funciones de influencia en la primera circunferencia mientras que la imagen de la derecha muestra las funciones de influencia para la segunda circunferencia.

La FIG. 19 muestra cómo varía el elemento de la fila 2 y de la columna 4 de la matriz **C** con el cambio de la posición angular de la rueda de diez radios de la FIG. 16.

DESCRIPCIÓN DE UNA REALIZACIÓN PREFERIDA

A continuación se expone, sin carácter limitativo, una realización de la invención de acuerdo con las características previamente apuntadas.

Con el objetivo de obtener las fuerzas y momentos en el contacto entre el neumático y la calzada es necesario instrumentar la llanta que monta dicho neumático con una pluralidad de sensores agrupados en dos circunferencias concéntricas con respecto del centro de la de la rueda (referencia 9 de la FIG. 4). Para seleccionar los diámetros más adecuados de dichas circunferencias, sería conveniente realizar un estudio teórico (por medio del método de los elementos finitos) o experimental. El modo de realización de dicho estudio se expondrá más adelante.

Dentro de cada circunferencia será necesario seleccionar al menos cuatro puntos de medida que se encuentren espaciados ángulos equidistantes entre sí. El número de puntos de medida seleccionados y su posición dependerá de la geometría de la llanta.

Los sensores se colocarán teniendo en cuenta estos puntos de medida de dos modos posibles (especificados anteriormente como *opción 1* y *opción 2*). Los puntos de medida se podrán seleccionar de modo que estén situados sobre la superficie de la llanta (ya sea en la parte interior de la misma, en la parte exterior, o en los laterales de los radios). En este caso, los sensores se podrán colocar directamente sobre los puntos de medida seleccionados siguiendo la *opción 1*, como se muestra en la primera circunferencia de la llanta de la imagen superior y de la llanta de la imagen del centro de la FIG. 8. También sería posible en este caso colocar los sensores de acuerdo con la *opción 2*, tal y como se muestra en la segunda circunferencia de la llanta de la imagen superior de la FIG. 8. Por otro lado, también se pueden seleccionar puntos de la circunferencia que no se encuentren situados en la superficie de la llanta como puntos de medida, siempre que sea posible encontrar dos puntos de la circunferencia simétricos con respecto a cada plano de medida que sí se

encuentren sobre la superficie de la llanta y en los que por tanto, se puedan colocar los sensores siguiendo la *opción 2*.

Siempre que la geometría de la llanta lo permita, es preferible que los puntos de medida de cada circunferencia se seleccionen de modo que coincidan con las intersecciones entre la circunferencia y planos de simetría de la llanta. Un plano de simetría es aquel que divide a la llanta en dos mitades simétricas con respecto a sí mismo, tal y como el que se muestra con la referencia 14 en la imagen superior de la FIG. 3. En concreto, la rueda de cinco radios de la FIG. 3 tiene cinco planos de simetría espaciados 72º entre sí. Cada plano de simetría de esta rueda coincide con el plano medio de uno de los radios de la llanta. En la vista en dos dimensiones de la rueda de cinco radios representada en la imagen inferior de la FIG. 3 se muestran los cinco planos de simetría de la llanta con líneas discontinuas.

Por ejemplo, en cada una de las llantas de las FIGS. 4-8 es posible encontrar cinco planos de simetría (referencia 14) espaciados 72º entre sí. En dichas llantas, los puntos de medida seleccionados en ambas circunferencias son aquellos que resultan de la intersección de dichas circunferencias con los cinco planos de simetría de la llanta. En estos casos, los planos de medida coinciden con planos de simetría de la llanta. En la imagen del centro de la FIG. 8 se puede observar cómo los puntos que resultan de las intersecciones entre los planos de simetría de la llanta y la segunda circunferencia no están situados sobre la superficie de la llanta. Por lo tanto, si seleccionamos como puntos de medida dichas intersecciones, no es posible colocar los sensores en dichos puntos siguiendo la *opción 1*. Sin embargo sí que es posible colocar pares de sensores según la *opción 2* en puntos de la circunferencia que sean simétricos con respecto a cada plano de simetría. Lo mismo ocurre en el caso de las dos circunferencias con las que se instrumenta la llanta de la imagen inferior de la misma figura. Por lo tanto, la segunda opción es especialmente útil en el caso de llantas con radios dobles como las que se muestran en la FIG. 8.

Por otro lado, la FIG. 11 muestra una llanta de camión con ocho agujeros que tiene dos tipos posibles de planos de simetría espaciados 45º entre sí. Se considerará que dos planos son del mismo tipo cuando las dos mitades en las que queda dividida la llanta por uno de ellos son iguales a las dos mitades en las que queda dividida la llanta por el otro. Por un lado, cada plano de simetría del primer tipo contiene al eje de rotación de la rueda y a la recta que une el centro de la llanta con el centro de uno de de los agujeros de la misma. Dichos planos se muestran con la referencia 14 en la imagen del centro de la FIG. 11. Por otro lado cada plano de simetría del segundo tipo contiene al eje de rotación y es angularmente equidistante a dos planos adyacentes de los definidos en la imagen del centro. Estos planos

se muestran con la referencia 14 en la imagen superior de la FIG. 11. En el caso en el que la llanta disponga de varios tipos de planos de simetría, como en la llanta de la FIG. 11, es posible seleccionar los puntos de medida en una de las circunferencias de acuerdo con uno de los tipos de planos y en la otra circunferencia según el otro tipo de planos de simetría, como ocurre en la imagen inferior. También es posible utilizar el mismo tipo de planos para ambas circunferencias (como en las imágenes del centro y superior de la misma figura). Sin embargo, no sería conveniente seleccionar como puntos de medida de la misma circunferencia aquéllos que resultan de la intersección entre dicha circunferencia y ambos tipos de planos.

Siempre que en la llanta se puedan encontrar planos de simetría del mismo tipo que intersequen a la circunferencia en al menos cuatro puntos espaciados ángulos equidistantes entre sí, sería conveniente que todos los puntos de medida coincidan con puntos resultantes de dichas intersecciones. Sin embargo, no es necesario seleccionar como puntos de medida todos los puntos resultantes de estas intersecciones, sino que se pueden seleccionar menos puntos siempre que el número seleccionado sea igual o mayor que cuatro y que se cumpla que los puntos de medida estén espaciados ángulos equidistantes entre sí, tal y como ocurre en la primera circunferencia de la llanta de la FIG. 10.

Sin embargo, en el caso en el que la llanta a instrumentar no tenga planos de simetría del mismo tipo que intersequen a la circunferencia en al menos cuatro puntos espaciados ángulos equidistantes entre sí, no será posible que todos los puntos de medida de la misma circunferencia coincidan con puntos intersección entre la circunferencia y planos de simetría de la llanta. Por ejemplo, en la llanta de la FIG. 13 es posible seleccionar seis puntos de medida espaciados 60º entre sí en cada circunferencia, ya que dicha llanta consta de seis radios espaciados entre sí este ángulo. Sin embargo, como la llanta no tiene seis agujeros para los tornillos, sino que únicamente tiene cuatro, es solamente posible encontrar un plano de simetría del mismo tipo que interseque a cada circunferencia en dos puntos. Estos dos puntos han sido seleccionados como puntos de medida en dicha figura. Por otro lado, como la llanta de la FIG. 14 tiene cinco radios espaciados ángulos equidistantes entre sí, es posible seleccionar en cada circunferencia cinco puntos de medida espaciados 72º entre sí. Sin embargo, como únicamente tiene cuatro agujeros para los tornillos, sólo es posible encontrar un plano de simetría que interseque a cada circunferencia en un punto. Dicho punto ha sido seleccionado como punto de medida en cada circunferencia. El resto de puntos se han seleccionado de modo que el punto *j* se encuentre distanciado un ángulo $(j-1)\cdot 72^{\circ}$ con respecto al punto que coincide con la intersección entre la circunferencia y el

plano de simetría (siendo dicho punto de intersección el utilizado como referencia para la numeración de los puntos de medida). Por lo tanto, sólo un plano de medida coincide con un plano de simetría de la llanta.

En cada circunferencia *i*, es necesario obtener tantas señales de deformación como puntos de medida seleccionados, es decir N_{Pi} señales de deformación. Si una determinada circunferencia *i* está formada por un total de N_{Pi} sensores colocados según la *opción 1*, se debe obtener una señal por cada sensor. Dicha señal coincide con la deformación en el punto en el que se encuentra emplazado el sensor. Para obtener dicha señal, si el sensor utilizado es una galga extensométrica, ésta se puede conectar utilizando ¼ de Puente de Wheatstone como el que se muestra en la imagen superior de la FIG. 12. La señal resultante de dicho circuito es aproximadamente proporcional a la señal de deformación en el punto en el que se encuentra situado el sensor, por lo que dicha deformación se puede obtener fácilmente dividiendo la tensión de salida del ¼ de Puente de Wheatstone por la constante de proporcionalidad.

Por el contrario, si la circunferencia considerada está formada por N_{Pi} pares de sensores colocados en la misma siguiendo la *opción 2*, se debe obtener una señal de deformación por cada par de sensores que estén colocados en puntos simétricos con respecto al mismo plano de medida. Dicha señal será igual a la suma de las deformaciones generadas en ambos puntos en los que se colocan los sensores del mismo par. Esta señal se puede obtener analógicamente, conectando los sensores del mismo par en ½ Puente de Wheatstone tal y como se muestra en la imagen inferior de la FIG. 12. La salida de este circuito es aproximadamente igual a una señal proporcional a la suma de las deformaciones generadas en los puntos en los que están colocados los sensores del mismo par. Por lo tanto, la señal requerida se puede obtener dividiendo la salida de este circuito por la constante de proporcionalidad. Asimismo, también es posible obtener dicha señal digitalmente. Para ello, se obtiene la señal de deformación en cada uno de los puntos conectando cada una de las galgas extensométricas del mismo par en ¼ Puente de Wheatstone y sumando digitalmente las señales de deformación resultantes.

La señal de deformación obtenida en la circunferencia *i* y en el punto de medida *j* se denota como $\varepsilon_{i,j}$. Dicha señal es periódica con el ángulo girado por la rueda. Por lo tanto, se puede expresar como una suma de series de Fourier del siguiente modo:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{i,j}\left(\gamma_{i,j},t\right) = {} & F_X\left(t\right)\left(\sum_{k=0}^{\infty} A_{i,j,k}^{f_1}\cdot\cos\left(k\gamma_{i,j}\right)+\sum_{k=0}^{\infty} B_{i,j,k}^{f_1}\cdot\sin\left(k\gamma_{i,j}\right)\right)+\\ & +F_Y\left(t\right)\left(\sum_{k=0}^{\infty} A_{i,j,k}^{f_2}\cdot\cos\left(k\gamma_{i,j}\right)+\sum_{k=0}^{\infty} B_{i,j,k}^{f_2}\cdot\sin\left(k\gamma_{i,j}\right)\right)+\\ & +F_Z\left(t\right)\left(\sum_{k=0}^{\infty} A_{i,j,k}^{f_3}\cdot\cos\left(k\gamma_{i,j}\right)+\sum_{k=0}^{\infty} B_{i,j,k}^{f_3}\cdot\sin\left(k\gamma_{i,j}\right)\right)+\\ & +M_X\left(t\right)\left(\sum_{k=0}^{\infty} A_{i,j,k}^{f_4}\cdot\cos\left(k\gamma_{i,j}\right)+\sum_{k=0}^{\infty} B_{i,j,k}^{f_4}\cdot\sin\left(k\gamma_{i,j}\right)\right)+\\ & +M_Y\left(t\right)\left(\sum_{k=0}^{\infty} A_{i,j,k}^{f_5}\cdot\cos\left(k\gamma_{i,j}\right)+\sum_{k=0}^{\infty} B_{i,j,k}^{f_5}\cdot\sin\left(k\gamma_{i,j}\right)\right)+\\ & +M_Z\left(t\right)\left(\sum_{k=0}^{\infty} A_{i,j,k}^{f_6}\cdot\cos\left(k\gamma_{i,j}\right)+\sum_{k=0}^{\infty} B_{i,j,k}^{f_6}\cdot\sin\left(k\gamma_{i,j}\right)\right)+\\ & +\zeta_i\left(t\right)\end{aligned} \qquad (1)$$

$$\gamma_{i,j} = \alpha_i + \beta_{i,j}$$

donde:

- F_X, F_Y y F_Z son las componentes, en los ejes *X*, *Y* y *Z* respectivamente, de la fuerza aplicada en el contacto neumático-calzada, tal y como se muestra en la FIG. 1.
- M_X, M_Y y M_Z son las componentes, en los ejes *X*, *Y* y *Z* respectivamente, del momento aplicado en el contacto neumático-calzada, según se observa en la FIG. 1.
- $\varepsilon_{i,j}$ es la deformación unitaria (en dirección radial o en otra dirección, según convenga) obtenida en el punto de medida *j* de la circunferencia *i*.
- $A_{i,j,k}^{f_1}$ es la amplitud del término en coseno *k* de la señal de deformación generada por una fuerza F_X unitaria en el punto de medida *j* de la circunferencia *i*. Análogamente, $A_{i,j,k}^{f_2}$, $A_{i,j,k}^{f_3}$, $A_{i,j,k}^{f_4}$, $A_{i,j,k}^{f_5}$ y $A_{i,j,k}^{f_6}$ son las amplitudes del término en coseno *k* de las señales de deformación generadas en el punto de medida *j* de la circunferencia *i* por los esfuerzos unitarios F_Y, F_Z, M_X, M_Y y M_Z respectivamente.
- $B_{i,j,k}^{f_1}$ es la amplitud del término en seno *k* de la señal de deformación generada por una fuerza F_X unitaria en el punto de medida *j* de la circunferencia *i*. Análogamente, $B_{i,j,k}^{f_2}$, $B_{i,j,k}^{f_3}$, $B_{i,j,k}^{f_4}$, $B_{i,j,k}^{f_5}$ y $B_{i,j,k}^{f_6}$ son las amplitudes del término en seno *k* de las señales de deformación generadas en el punto de medida *j* de la circunferencia *i* por los esfuerzos unitarios F_Y, F_Z, M_X, M_Y y M_Z respectivamente.

- $\gamma_{i,j}$ es la posición angular del plano de medida *j* (referencia 11 de la FIG. 15) de la circunferencia *i* (referencia 9 de la FIG. 15) con respecto al plano de aplicación de los esfuerzos (referencia 15 de la FIG. 15), que coincide con el plano YZ del sistema de referencia representado en la FIG. 1.
- α_i es la posición angular del plano de medida de la circunferencia *i* tomado como referencia para la numeración de los puntos de medida de dicha circunferencia (es decir, del plano de medida *j=1*, señalado con la referencia 16 en la FIG. 15) con respecto al plano de aplicación de los esfuerzos (referencia 15 de la FIG. 15). Por tanto, se cumple que $\alpha_i = \gamma_{i,1}$.
- $\beta_{i,j}$ es la posición angular del plano de medida *j* (referencia 11 de la FIG. 15) de la circunferencia *i* con respecto al plano de medida de referencia para dicha circunferencia, correspondiente con *j=1* (referencia 16 de la FIG. 15). A diferencia del resto de coordenadas angulares, $\beta_{i,j}$ no cambia de valor con el giro de la rueda y es un múltiplo de 360º dividido por el número de puntos de medida de la circunferencia, es decir, $\beta_{i,j} = (j-1)360º/N_{Pi}$.
- ζ_i es la deformación unitaria causada en la circunferencia de medida *i* por aquellos factores como la temperatura, las fuerzas centrífugas, la presión... y que no varía con el cambio de la posición angular del punto de medida.

Si el punto de medida *j* de la circunferencia *i* se encuentra contenido perfectamente en un plano de simetría de la llanta, los términos $A_{i,j,k}^{f_1}$, $A_{i,j,k}^{f_5}$, $A_{i,j,k}^{f_6}$, $B_{i,j,k}^{f_2}$, $B_{i,j,k}^{f_3}$ y $B_{i,j,k}^{f_4}$ son iguales a cero. Además, si todos los puntos de medida se encuentran perfectamente contenidos en planos de simetría de la llanta del mismo tipo, entonces $A_{i,1,k}^{f_m} = A_{i,2,k}^{f_m} = \ldots = A_{i,N_{Pi},k}^{f_m}$ y $B_{i,1,k}^{f_m} = B_{i,2,k}^{f_m} = \ldots = B_{i,N_{Pi},k}^{f_m}$ *(m=1, 2, ..., 6)*.

Como se observa en la expresión anterior, las señales correspondientes a cada punto de medida no sólo dependen de las fuerzas y de los momentos que se quieren medir, sino que además dependen del ángulo de los planos de medida con respecto al plano de aplicación de los esfuerzos y de otros factores contenidos en ζ_i. Por ello, dichas señales no se pueden utilizar directamente para medir las fuerzas y momentos generados en el contacto entre el neumático y calzada, sino que es necesario su tratamiento previo.

De este modo, después de la amplificación y filtrado de las señales de deformación de cada circunferencia, éstas se deben combinar de manera que se obtengan al menos tres señales del *tipo 1* y al menos tres señales del *tipo 2* entre las dos circunferencias para poder obtener las tres fuerzas y los tres momentos generados en el contacto neumático-calzada:

- Señales del *tipo 1*:
  - *Señal $E_{S1,i}$:* Señal cuya componente continua es igual al valor medio de las amplitudes del primer término en coseno de las N_{Pi} señales de deformación de la circunferencia *i*, es decir,

$$E_{S1,i} = F_X(t)\sum_{j=1}^{N_{Pi}} \frac{A_{i,j,1}^{f_1}}{N_{Pi}} + F_Y(t)\sum_{j=1}^{N_{Pi}} \frac{A_{i,j,1}^{f_2}}{N_{Pi}} + F_Z(t)\sum_{j=1}^{N_{Pi}} \frac{A_{i,j,1}^{f_3}}{N_{Pi}} + \\ +M_X(t)\sum_{j=1}^{N_{Pi}} \frac{A_{i,j,1}^{f_4}}{N_{Pi}} + M_Y(t)\sum_{j=1}^{N_{Pi}} \frac{A_{i,j,1}^{f_5}}{N_{Pi}} + M_Z(t)\sum_{j=1}^{N_{Pi}} \frac{A_{i,j,1}^{f_6}}{N_{Pi}} + \xi_{S1,i}(\theta) \qquad (2)$$

  - *Señal $E_{S2,i}$:* Señal cuya componente continua es igual al valor medio de las amplitudes del segundo término en coseno de las N_{Pi} señales de deformación de la circunferencia *i*, es decir

$$E_{S2,i} = F_X(t)\sum_{j=1}^{N_{Pi}} \frac{A_{i,j,2}^{f_1}}{N_{Pi}} + F_Y(t)\sum_{j=1}^{N_{Pi}} \frac{A_{i,j,2}^{f_2}}{N_{Pi}} + F_Z(t)\sum_{j=1}^{N_{Pi}} \frac{A_{i,j,2}^{f_3}}{N_{Pi}} + \\ +M_X(t)\sum_{j=1}^{N_{Pi}} \frac{A_{i,j,2}^{f_4}}{N_{Pi}} + M_Y(t)\sum_{j=1}^{N_{Pi}} \frac{A_{i,j,2}^{f_5}}{N_{Pi}} + M_Z(t)\sum_{j=1}^{N_{Pi}} \frac{A_{i,j,2}^{f_6}}{N_{Pi}} + \xi_{S2,i}(\theta) \qquad (3)$$

- Señales del *tipo 2*:
  - *Señal $E_{A1,i}$:* Señal cuya componente continua es igual al valor medio de las amplitudes del primer término en seno de las N_{Pi} señales de deformación de la circunferencia *i*, es decir,

$$E_{A1,i} = F_X(t)\sum_{j=1}^{N_{Pi}} \frac{B_{i,j,1}^{f_1}}{N_{Pi}} + F_Y(t)\sum_{j=1}^{N_{Pi}} \frac{B_{i,j,1}^{f_2}}{N_{Pi}} + F_Z(t)\sum_{j=1}^{N_{Pi}} \frac{B_{i,j,1}^{f_3}}{N_{Pi}} + \\ +M_X(t)\sum_{j=1}^{N_{Pi}} \frac{B_{i,j,1}^{f_4}}{N_{Pi}} + M_Y(t)\sum_{j=1}^{N_{Pi}} \frac{B_{i,j,1}^{f_5}}{N_{Pi}} + M_Z(t)\sum_{j=1}^{N_{Pi}} \frac{B_{i,j,1}^{f_6}}{N_{Pi}} + \xi_{A1,i}(\theta) \qquad (4)$$

- *Señal $E_{A2,i}$:* Señal cuya componente continua es igual al valor medio de las amplitudes del segundo término en seno de las N_{Pi} señales de deformación de la circunferencia *i*, es decir,

$$E_{A2,i} = F_X(t)\sum_{j=1}^{N_{Pi}} \frac{B_{i,j,2}^{f_1}}{N_{Pi}} + F_Y(t)\sum_{j=1}^{N_{Pi}} \frac{B_{i,j,2}^{f_2}}{N_{Pi}} + F_Z(t)\sum_{j=1}^{N_{Pi}} \frac{B_{i,j,2}^{f_3}}{N_{Pi}} + \\ + M_X(t)\sum_{j=1}^{N_{Pi}} \frac{B_{i,j,2}^{f_4}}{N_{Pi}} + M_Y(t)\sum_{j=1}^{N_{Pi}} \frac{B_{i,j,2}^{f_5}}{N_{Pi}} + M_Z(t)\sum_{j=1}^{N_{Pi}} \frac{B_{i,j,2}^{f_6}}{N_{Pi}} + \xi_{A2,i}(\theta) \quad (5)$$

donde $\xi_{S1,i}(\theta)$, $\xi_{S2,i}(\theta)$, $\xi_{A1,i}(\theta)$ y $\xi_{A2,i}(\theta)$ son respectivamente los rizados de las señales $E_{S1,i}$, $E_{S2,i}$, $E_{A1,i}$ y $E_{A2,i}$, es decir son la parte de dichas señales cuyo valor varía con el ángulo girado por la rueda. A este ángulo se le denominará θ.

Para medir el ángulo girado por la rueda θ será necesario tomar como referencia un plano de la llanta que contenga al eje de la rueda (referencia 3 de la FIG. 1) y sea ortogonal al plano medio de la misma (referencia 2 de la FIG. 1). A dicho plano se le denominará plano de referencia de la rueda (referencia 17 de la FIG. 15). De este modo, el ángulo θ será el ángulo comprendido entre dicho plano de referencia y el plano de aplicación de los esfuerzos. Preferiblemente, el plano de referencia de la rueda coincidirá con el plano de medida tomado como referencia para la numeración de los puntos de medida de una de las circunferencias. Por ejemplo, se podría seleccionar como plano de referencia de la rueda el plano de medida correspondiente con *j=1* de la circunferencia *i=1*, y de este modo se tiene que $\theta = \alpha_1$. Así se ha hecho en la FIG. 15, donde se puede ver cómo los planos con las referencias 16 y 17 coinciden. De un modo similar, si se selecciona el plano de medida *j=1* de la circunferencia *i=2* como plano de referencia de la rueda, entonces $\theta = \alpha_2$.

Las señales del *tipo 1* y del *tipo 2* antes descritas se pueden calcular combinando las señales de deformación de la misma circunferencia del siguiente modo:

$$E_{P1,i} = \frac{2}{N_{Pi}} \sum_{j=1}^{N_{Pi}} \left(\varepsilon_{i,j} \cdot \cos\left((j-1)\frac{2\pi}{N_{Pi}} \right) \right) \quad (6)$$

$$E_{Q1,i} = \frac{2}{N_{Pi}} \sum_{j=1}^{N_{Pi}} \left(\varepsilon_{i,j} \cdot \sin\left((j-1)\frac{2\pi}{N_{Pi}} \right) \right) \quad (7)$$

$$E_{P2,i} = \frac{2}{N_{Pi}} \sum_{j=1}^{N_{Pi}} \left(\varepsilon_{i,j} \cdot \cos\left(2 \cdot (j-1) \frac{2\pi}{N_{Pi}} \right) \right) \quad (8)$$

$$E_{Q2,i} = \frac{2}{N_{Pi}} \sum_{j=1}^{N_{Pi}} \left(\varepsilon_{i,j} \cdot \sin\left(2 \cdot (j-1) \frac{2\pi}{N_{Pi}} \right) \right) \quad (9)$$

$$E_{S1,i} = E_{P1,i} \cos(\alpha_i) - E_{Q1,i} \sin(\alpha_i) \quad (10)$$

$$E_{S2,i} = E_{P2,i} \cos(2\alpha_i) - E_{Q2,i} \sin(2\alpha_i) \quad (11)$$

$$E_{A1,i} = E_{P1,i} \sin(\alpha_i) + E_{Q1,i} \cos(\alpha_i) \quad (12)$$

$$E_{A2,i} = E_{P2,i} \sin(2\alpha_i) + E_{Q2,i} \cos(2\alpha_i) \quad (13)$$

Preferiblemente, se calcularán las señales $E_{S1,i}$ (mediante las ecuaciones (6), (7) y (10)) y $E_{A1,i}$ (aplicando las ecuaciones (6), (7) y (12)) en las dos circunferencias, y las señales $E_{S2,i}$ (a través de las ecuaciones (8), (9) y (11)) y $E_{A2,i}$ (con las ecuaciones (8), (9) y (13)) en al menos una de las circunferencias. El número de circunferencias en las que se calculan las señales $E_{S1,i}$, $E_{A1,i}$, $E_{S2,i}$ y $E_{A2,i}$ se denotará respectivamente como n_{S1}, n_{A1}, n_{S2} y n_{A2}. El número de circunferencias en las que se calcule cada una de las señales puede ser diferente pero siempre se debe cumplir que $n_{S1}+ n_{S2}\geq 3$ y $n_{A1}+ n_{A2}\geq 3$.

Los esfuerzos generados en el contacto entre el neumático y la calzada se obtienen mediante la combinación lineal de las señales de los tipos $E_{S1,i}$, $E_{A1,i}$, $E_{S2,i}$ y $E_{A2,i}$ calculadas en las dos circunferencias con las que se ha instrumentado la llanta. Los coeficientes que se utilizan para realizar dicha combinación lineal son característicos de la rueda que se quiera instrumentar y por tanto, son diferentes para cada tipo de rueda. Estos coeficientes dependen además de los diámetros de las circunferencias de medida. Por estas razones, dichos coeficientes deben obtenerse mediante calibración.

De aquí en adelante, llamaremos **f** al vector que contiene todos los esfuerzos:

$$\mathbf{f}(t)=\left[F_X(t) \quad F_Y(t) \quad F_Z(t) \quad M_X(t) \quad M_Y(t) \quad M_Z(t)\right]^T \tag{14}$$

y **e** al vector que contiene todas las señales de los tipos $E_{S1,i}$, $E_{A1,i}$, $E_{S2,i}$ y $E_{A2,i}$ calculadas en las diferentes circunferencias de medida. Por ejemplo, si las señales $E_{S1,i}$, $E_{A1,i}$, $E_{S2,i}$ y $E_{A2,i}$ se han calculado en ambas circunferencias, el vector **e** se puede expresar como sigue:

$$\mathbf{e}=\left[E_{S1,1} \quad E_{S1,2} \quad E_{S2,1} \quad E_{S2,2} \quad E_{A1,1} \quad E_{A1,2} \quad E_{A2,1} \quad E_{A2,2}\right]^T \tag{15}$$

Será necesario obtener mediante calibración una matriz de coeficientes **C** dependiente del ángulo girado por la rueda θ de modo que se cumpla,

$$\mathbf{f}=\mathbf{C}(\theta)\mathbf{e} \tag{16}$$

Los coeficientes de la matriz **C** obtenidos mediante calibración se pueden utilizar para obtener cada uno de los esfuerzos contenidos en el vector **f**. De esta manera el elemento *m* (*m=1, 2, ...6*) del vector **f**, f_m, se puede obtener a partir de la combinación lineal de las señales $E_{S1,i}$, $E_{A1,i}$, $E_{S2,i}$ y $E_{A2,i}$ calculadas en las dos circunferencias del siguiente modo:

$$f_m=\sum_{n=1}^{n_{S1}+n_{S2}+n_{A1}+n_{A2}} c_{m,n}(\theta)e_n, \qquad m=1,\ldots,6 \tag{17}$$

donde $c_{m,n}(\theta)$ es el elemento situado en la fila *m* y la columna *n* de la matriz **C**, f_m es el elemento *m* del vector **f** (por ejemplo $f_2=F_Y$) y e_n es el elemento *n* del vector **e** (por ejemplo, en el caso concreto en el que el vector **e** tenga la expresión de la ecuación (15), $e_3= E_{S2,1}$). El número de elementos del vector **e** es igual a la suma $n_{S1}+n_{S2}+n_{A1}+n_{A2}$.

Para poder llevar a cabo el método expuesto en la presente invención, es necesario realizar previamente un proceso de calibración como el que se expone a continuación para obtener cada uno de los coeficientes $c_{m,n}(\theta)$. Este proceso de calibración consta de los siguientes pasos:

Paso 1: Determinación de las funciones de influencia.

En primer lugar, es necesario conocer todas las señales de deformación generadas en las dos circunferencias cuando se aplica en el contacto neumático-calzada cada uno de los

esfuerzos con un valor unitario manteniendo el resto de los esfuerzos iguales a cero. A las deformaciones generadas en estas condiciones se les conocerá como funciones de influencia. La función de influencia del esfuerzo f_m sobre la deformación generada en el punto de medida *j* de la circunferencia *i* tiene la siguiente expresión:

$$a_{i,j}^{f_m}(\theta) = \sum_{k=0}^{\infty} A_{i,j,k}^{f_m} \cdot \cos\left(k\gamma_{i,j}\right) + \sum_{k=0}^{\infty} B_{i,j,k}^{f_m} \cdot \sin\left(k\gamma_{i,j}\right) \qquad (18)$$

Por ejemplo, $a_{i,j}^{f_4}(\theta)$ es la deformación generada en la circunferencia *i* por el sensor o par de sensores situado en el punto de medida *j* cuando la rueda se encuentra en la posición angular θ y se aplica en el contacto entre el neumático y la calzada un momento M_X igual a 1 N m (resto de esfuerzos iguales a cero).

Así por ejemplo, para hallar las funciones de influencia del esfuerzo f_m sobre las deformaciones en la llanta, se puede llevar a cabo un procedimiento de ensayos como el siguiente:

- Se coloca la rueda en una determinada posición angular. En el caso de que se trate del primer ensayo, la rueda se coloca de modo que el plano de referencia de la rueda se encuentre a cero grados del plano de aplicación de los esfuerzos ($\theta = 0^{\circ}$).
- Con la rueda colocada en dicha posición angular, se aplica al menos un escalón de magnitud conocida del esfuerzo f_m en el contacto entre el neumático y la superficie de rodadura. Si fuera posible, sería preferible aplicar varios escalones de diferente magnitud del esfuerzo f_m o incluso repetir el mismo escalón (o escalones) para poder disponer de más datos a partir de los cuales hallar las funciones de influencia mediante la resolución de un sistema de ecuaciones sobredeterminado. Las deformaciones provenientes de todos los sensores deben ser adquiridas durante la aplicación de dicho escalón (o escalones). El esfuerzo aplicado también debe ser medido (por ejemplo, mediante una célula de carga), así como la posición angular de la rueda θ.
- Una vez que cesa la aplicación del esfuerzo, la rueda debe girar un determinado ángulo $\Delta\theta$.
- Cuando la rueda se encuentra en la nueva posición angular, se vuelve a aplicar el esfuerzo tal y como se hizo cuando la rueda se encontraba situada en la posición angular anterior.

– El proceso descrito se repite cada $\Delta\theta$ radianes hasta que se completa una vuelta completa de la rueda, es decir hasta que la rueda alcanza una posición angular $\theta = 2\pi$ radianes.

Si se han aplicado N_e escalones del esfuerzo f_m en el contacto entre el neumático y la superficie de rodadura cuando la rueda se encuentra en una posición angular θ, el valor de la función de influencia del esfuerzo f_m sobre las deformación en el punto de medida *j* de la circunferencia *i* para dicha posición angular se puede calcular mediante la resolución del siguiente sistema de ecuaciones, que es sobredeterminado si $N_e > 1$:

$$\begin{bmatrix} f_m^1 \\ f_m^2 \\ \vdots \\ f_m^{N_e} \end{bmatrix} a_{i,j}^{f_m}(\theta) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{i,j}^1(\theta) \\ \varepsilon_{i,j}^2(\theta) \\ \vdots \\ \varepsilon_{i,j}^{N_e}(\theta) \end{bmatrix} \tag{19}$$

donde el superíndice utilizado en los elementos de la matriz de coeficientes y del vector de términos independientes hace referencia al escalón aplicado. Cada uno de los valores de la matriz de coeficientes (que incluye las medidas de los esfuerzos en los escalones) o del vector de valores independientes (que incluye las medidas de las deformaciones) puede corresponderse con el valor en un instante de tiempo o con el valor medio de un intervalo de tiempo del escalón especificado con el superíndice. Este proceso debería realizarse para cada uno de los seis esfuerzos, de modo que se obtengan las funciones de influencia de todos los esfuerzos.

En el caso en el que no fuera posible aplicar un esfuerzo f_m de manera aislada y fuera necesario aplicar N_f esfuerzos al mismo tiempo (por ejemplo, sería complicado aplicar un esfuerzo M_X sin aplicar al mismo tiempo una fuerza F_Z desplazada una determinada distancia en dirección *Y* con respecto al punto teórico de contacto), dichos esfuerzos se deberían aplicar de manera simultánea en al menos tantos escalones como esfuerzos se estén aplicando al mismo tiempo (es decir $N_e \geq N_f$). Se deberían variar las magnitudes de los esfuerzos en los escalones de modo que se pudieran obtener las funciones de influencia de los N_f esfuerzos resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones, que es sobredeterminado si $N_e > N_f$:

$$\begin{bmatrix} f_1^1 & f_2^1 & \cdots & f_{N_f}^1 \\ f_1^2 & f_2^2 & \cdots & f_{N_f}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_1^{N_e} & f_2^{N_e} & \cdots & f_{N_f}^{N_e} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_{i,j}^{f_1}(\theta) \\ a_{i,j}^{f_2}(\theta) \\ \vdots \\ a_{i,j}^{f_{N_f}}(\theta) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{i,j}^1(\theta) \\ \varepsilon_{i,j}^2(\theta) \\ \vdots \\ \varepsilon_{i,j}^{N_e}(\theta) \end{bmatrix} \qquad (20)$$

Paso 2: Combinación lineal de las funciones de influencia.

En un segundo paso, se deben combinar las funciones de influencia obtenidas en el paso anterior de modo que se obtenga una matriz **D** de dimensión $(n_{S1}+n_{S2}+n_{A1}+n_{A2})\times 6$. El elemento de la fila *v* y de la columna *w* de la matriz **D** se calcula de acuerdo con las siguientes expresiones:

$$d_{v,w}(\theta)=\frac{2}{N_{Pi}}\sum_{j=1}^{N_{Pi}}\left(a_{i,j}^{f_w}(\theta)\cdot\cos\left(\alpha_i+(j-1)\frac{2\pi}{N_{Pi}}\right)\right) \quad \text{si} \quad e_v=E_{S1,i} \qquad (21)$$

$$d_{v,w}(\theta)=\frac{2}{N_{Pi}}\sum_{j=1}^{N_{Pi}}\left(a_{i,j}^{f_w}(\theta)\cdot\cos\left(2\alpha_i+2\cdot(j-1)\frac{2\pi}{N_{Pi}}\right)\right) \quad \text{si} \quad e_v=E_{S2,i} \qquad (22)$$

$$d_{v,w}(\theta)=\frac{2}{N_{Pi}}\sum_{j=1}^{N_{Pi}}\left(a_{i,j}^{f_w}(\theta)\cdot\sin\left(\alpha_i+(j-1)\frac{2\pi}{N_{Pi}}\right)\right) \quad \text{si} \quad e_v=E_{A1,i} \qquad (23)$$

$$d_{v,w}(\theta)=\frac{2}{N_{Pi}}\sum_{j=1}^{N_{Pi}}\left(a_{i,j}^{f_w}(\theta)\cdot\sin\left(2\alpha_i+2\cdot(j-1)\frac{2\pi}{N_{Pi}}\right)\right) \quad \text{si} \quad e_v=E_{A2,i} \qquad (24)$$

Por ejemplo, en el caso en el que se hayan calculado todas las señales en las dos circunferencias y se tenga un vector **e** con la expresión de la ecuación (15), la matriz **D** se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\mathbf{D}=\frac{2}{N_{Pi}}\begin{bmatrix}
\sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{1,j}^{f_1}\cdot\cos\left(\gamma_{1,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{1,j}^{f_2}\cdot\cos\left(\gamma_{1,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{1,j}^{f_3}\cdot\cos\left(\gamma_{1,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{1,j}^{f_4}\cdot\cos\left(\gamma_{1,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{1,j}^{f_5}\cdot\cos\left(\gamma_{1,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{1,j}^{f_6}\cdot\cos\left(\gamma_{1,j}\right) \\
\sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{2,j}^{f_1}\cdot\cos\left(\gamma_{2,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{2,j}^{f_2}\cdot\cos\left(\gamma_{2,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{2,j}^{f_3}\cdot\cos\left(\gamma_{2,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{2,j}^{f_4}\cdot\cos\left(\gamma_{2,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{2,j}^{f_5}\cdot\cos\left(\gamma_{2,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{2,j}^{f_6}\cdot\cos\left(\gamma_{2,j}\right) \\
\sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{1,j}^{f_1}\cdot\cos\left(2\gamma_{1,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{1,j}^{f_2}\cdot\cos\left(2\gamma_{1,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{1,j}^{f_3}\cdot\cos\left(2\gamma_{1,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{1,j}^{f_4}\cdot\cos\left(2\gamma_{1,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{1,j}^{f_5}\cdot\cos\left(2\gamma_{1,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{1,j}^{f_6}\cdot\cos\left(2\gamma_{1,j}\right) \\
\sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{2,j}^{f_1}\cdot\cos\left(2\gamma_{2,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{2,j}^{f_2}\cdot\cos\left(2\gamma_{2,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{2,j}^{f_3}\cdot\cos\left(2\gamma_{2,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{2,j}^{f_4}\cdot\cos\left(2\gamma_{2,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{2,j}^{f_5}\cdot\cos\left(2\gamma_{2,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{2,j}^{f_6}\cdot\cos\left(2\gamma_{2,j}\right) \\
\sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{1,j}^{f_1}\cdot\sin\left(\gamma_{1,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{1,j}^{f_2}\cdot\sin\left(\gamma_{1,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{1,j}^{f_3}\cdot\sin\left(\gamma_{1,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{1,j}^{f_4}\cdot\sin\left(\gamma_{1,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{1,j}^{f_5}\cdot\sin\left(\gamma_{1,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{1,j}^{f_6}\cdot\sin\left(\gamma_{1,j}\right) \\
\sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{2,j}^{f_1}\cdot\sin\left(\gamma_{2,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{2,j}^{f_2}\cdot\sin\left(\gamma_{2,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{2,j}^{f_3}\cdot\sin\left(\gamma_{2,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{2,j}^{f_4}\cdot\sin\left(\gamma_{2,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{2,j}^{f_5}\cdot\sin\left(\gamma_{2,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{2,j}^{f_6}\cdot\sin\left(\gamma_{2,j}\right) \\
\sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{1,j}^{f_1}\cdot\sin\left(2\gamma_{1,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{1,j}^{f_2}\cdot\sin\left(2\gamma_{1,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{1,j}^{f_3}\cdot\sin\left(2\gamma_{1,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{1,j}^{f_4}\cdot\sin\left(2\gamma_{1,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{1,j}^{f_5}\cdot\sin\left(2\gamma_{1,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{1,j}^{f_6}\cdot\sin\left(2\gamma_{1,j}\right) \\
\sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{2,j}^{f_1}\cdot\sin\left(2\gamma_{2,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{2,j}^{f_2}\cdot\sin\left(2\gamma_{2,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{2,j}^{f_3}\cdot\sin\left(2\gamma_{2,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{2,j}^{f_4}\cdot\sin\left(2\gamma_{2,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{2,j}^{f_5}\cdot\sin\left(2\gamma_{2,j}\right) & \sum_{j=1}^{N_{Pi}} a_{2,j}^{f_6}\cdot\sin\left(2\gamma_{2,j}\right)
\end{bmatrix} \quad (25)$$

donde,

$$\gamma_{i,j}=\alpha_i+\left(j-1\right)\frac{2\pi}{N_{Pi}} \quad (26)$$

Paso 3: Obtención de los coeficientes de la matriz **C**.

Por último, la matriz **C** se obtiene como la inversa por la izquierda de la matriz **D** mediante el método matemático adecuado, como puede ser la pseudoinversa de Moore-Penrose:

$$\mathbf{C}\left(\theta\right)=\mathbf{D}\left(\theta\right)^{+} \quad (27)$$

donde $\mathbf{D}\left(\theta\right)^{+}$ es la pseudoinversa de Moore-Penrose de $\mathbf{D}\left(\theta\right)$.

Si se sigue el proceso de calibración citado, sólo se obtienen valores de los coeficientes $c_{m,n}\left(\theta\right)$ en aquellas posiciones angulares θ en las que se hayan realizado ensayos para calcular las funciones de influencia. Si se quieren medir los esfuerzos en otras posiciones angulares intermedias, se pueden obtener los coeficientes $c_{m,n}\left(\theta\right)$ que se deben utilizar en dichas posiciones mediante interpolación de los valores obtenidos mediante el proceso de calibración citado.

Para que el error en la medida de los esfuerzos que aparecen en el contacto neumático-calzada sea bajo y este no sea muy sensible a errores en la calibración o en las medidas de las señales de deformación, es necesario que la matriz **C** (o **D**) tenga un buen condicionamiento numérico. Como los coeficientes de la matriz **C** dependen de la posición de los puntos de medida seleccionados, es necesario elegir los diámetros de las circunferencias que den como resultado una matriz **C** buen condicionamiento numérico. Para ello, se recomienda realizar un estudio teórico (mediante un análisis por el método de los elementos finitos) o un análisis experimental previo a la instrumentación definitiva de la llanta que permita seleccionar unos puntos de medida agrupados en circunferencias que den como resultado una matriz **C** con un buen condicionamiento numérico. Dicho estudio debería comprender los siguientes pasos:

- Se seleccionan varias circunferencias (más de dos) y puntos de medida de la llanta en los que se puedan colocar los sensores siguiendo la primera o la segunda opción. Si se opta por un estudio teórico, habría que realizar un modelo de elementos finitos de la rueda. Si se opta por el estudio experimental, se deberían colocar los sensores agrupados en las circunferencias seleccionadas y siguiendo los puntos de medida elegidos según la primera o la segunda opción.
- Se calculan las funciones de influencia de cada uno de los esfuerzos sobre los puntos de medida seleccionados. Si se opta por el estudio experimental, dichas funciones de influencia se deben calcular tal y como se describió previamente en el proceso de calibración. Si se opta por la opción teórica, se debe realizar un procedimiento similar al anterior, pero en este caso se deben sustituir los ensayos por un análisis por el método de los elementos finitos en el que se calculen las deformaciones en cada uno de los posibles puntos de medida aplicando diferentes condiciones de carga sobre el neumático en diferentes posiciones angulares de la rueda.
- Se seleccionan dos circunferencias posibles de las analizadas, se calcula la matriz **D** (a partir de las funciones de influencia utilizando las ecuaciones (21)-(24)) o **C** (como la inversa por la izquierda de **D**) para esta combinación de circunferencias y se obtiene el número de condición de alguna de estas matrices.
- Se repite el paso anterior para el resto de combinaciones posibles de circunferencias analizadas.
- Se selecciona la combinación de circunferencias y puntos de medida que hayan dado como resultado una matriz **D** o **C** con un menor número de condición.

En resumen, para llevar a cabo la invención expuesta en esta patente las N_{P1} señales de deformaciones obtenidas en la *circunferencia 1* y las N_{P2} señales medidas en la *circunferencia 2* se deben procesar utilizando las expresiones de las ecuaciones (6)-(13) para obtener entre las dos circunferencias al menos tres señales del *tipo 1* (preferiblemente, se calcula la señal del tipo $E_{S1,i}$ en ambas circunferencias y la señal $E_{S2,i}$ en al menos una de las circunferencias) y tres señales del *tipo 2* (preferiblemente, se calcula la señal del tipo $E_{A1,i}$ en ambas circunferencias y la señal $E_{A2,i}$ en al menos una circunferencia). Con posterioridad, las señales calculadas en ambas circunferencias se combinan entre sí utilizando la expresión de la ecuación (17) para determinar las tres fuerzas y los tres momentos en el contacto neumático-calzada.

Aunque es posible realizar este procesamiento en una unidad de control ubicada en el interior del vehículo, se recomienda que dicho procesamiento se realice en un microcontrolador ubicado en la rueda, debido a la elevada cantidad de señales de deformación que se deberían transmitir a la unidad de control del vehículo en caso contrario ($N_{P1}+N_{P2}+1$ señales). Por lo tanto, es recomendable introducir dichas señales en un microcontrolador a través del correspondiente conversor Analógico/Digital, que debe tener al menos $N_{P1}+N_{P2}+1$ canales para procesar las señales de deformación según las ecuaciones (6)-(13) y (17).

Las señales de deformación se pueden obtener mediante un sensor adecuado, como pueden ser galgas extensométricas, sensores piezoeléctricos... Las señales de deformación son de muy bajo nivel, por lo que es necesaria su amplificación. Se recomienda la utilización de galgas extensométricas lineales pegadas en dirección radial. No sería necesario acondicionar las galgas extensométricas para realizar compensación de temperatura, ya que ésta se compensa directamente gracias al procesado de señales que se realiza aplicando las ecuaciones (6)-(13).

Si se utiliza un sensor por punto de medida (es decir, se sigue la *opción 1* descrita) cada una de las galgas extensométricas se puede acondicionar en ¼ de puente de Wheatstone. Sin embargo si se utiliza un par de sensores por cada punto de medida (es decir, las galgas extensométricas se pegan en la llanta siguiendo la *opción 2*), los dos sensores del mismo par se pueden acondicionar en ½ de puente de Wheatstone, obteniéndose una señal de deformación por cada par de sensores. Por el contrario, si cada sensor del mismo par se acondiciona siguiendo ¼ de puente de Wheatstone, las dos señales de deformación

resultantes de ambos puentes de Wheatstone se deben sumar en el microcontrolador antes de aplicar las ecuaciones (6)-(13).

Como se ha visto, también es necesaria la medición de la posición angular (θ) de algún plano de referencia de la llanta. Los sensores más adecuados para la medición de esta posición angular son los "resolvers" y los "encoders".

Por último, para transmitir las señales obtenidas en la rueda a la unidad de control ubicada en el vehículo es necesaria la utilización de algún sistema de telemetría o equipo de anillos rozantes.

APLICACIÓN INDUSTRIAL

A continuación se muestra como ejemplo la aplicación de la presente invención a una llanta de diez radios como la de la FIG. 16. Se trata de una llanta $7\frac{1}{2}'$ 17¢ forjada en aluminio sobre la que se monta un neumático 205/40 R17.

Dicha llanta consta de diez radios y cinco agujeros para los tornillos, dando como resultado cinco planos de simetría (referencia 14 de la FIG. 16). Dicha llanta se ha instrumentado con el mínimo número de sensores posible para poder llevar a cabo el método propuesto en la presente invención con esta llanta, es decir, se han colocado en la llanta diez galgas extensométricas distribuidas en dos circunferencias. Dentro de cada circunferencia, se han seleccionado cinco puntos de medida, situados sobre la superficie exterior de los radios de la llanta, tal y como se muestra en la FIG. 16. Los sensores se colocan directamente sobre los puntos de medida siguiendo la *opción 1*. En este caso ambas circunferencias se han instrumentado con el mismo número de sensores colocados en las mismas posiciones angulares.

Una vez que la llanta se ha instrumentado siguiendo los puntos de medida seleccionados, es necesario llevar a cabo un proceso de calibración que permita obtener los elementos de la matriz **C** descrita con anterioridad. Para ello, es necesario conocer en primer lugar las funciones de influencia previamente definidas de cada uno de los esfuerzos.

Como ejemplo, se describe a continuación el procedimiento que se debe seguir para obtener las funciones de influencia sobre las deformaciones en los puntos de medida de la llanta de uno de los esfuerzos (en concreto, se va exponer el procedimiento para hallar las funciones de influencia de F_Z). Para ello, se puede seguir el siguiente procedimiento de ensayos:

- Se coloca la rueda de manera que el plano de referencia coincida con el plano de aplicación de los esfuerzos. Dicha posición angular de la rueda se tomará como $\theta = 0^{\circ}$.
- Se aplican cuatro escalones de fuerza vertical sobre el neumático (de aproximadamente 3000 N, 4000 N, 5000 N y 6000 N), con una duración aproximada de 25 segundos cada uno. En la imagen superior de la FIG. 17 se muestran las medidas de las fuerzas aplicadas, mientras que en la imagen inferior de la FIG. 17 se muestran todas las señales de deformación obtenidas en los puntos de medida de la llanta.
- Una vez que se han terminado de aplicar los cuatro escalones de fuerza, se gira la rueda 9º y se vuelven a aplicar los cuatros escalones de fuerza con la rueda fijada en la nueva posición angular.
- Se vuelve a repetir el procedimiento de aplicar fuerzas en cuatro escalones cada 9º hasta completar una vuelta completa de la rueda.

A partir de las mediciones realizadas durante los ensayos descritos, se pueden obtener los valores cada 9º de las funciones de influencia del esfuerzo F_Z sobre la deformación en los distintos puntos de medida de la llanta. Para hallar el valor de la función de influencia $a_{i,j}^{f_3}(\theta)$ en la posición angular θ, se puede resolver un sistema de ecuaciones sobredeterminado como el que sigue mediante el método de los mínimos cuadrados:

$$\begin{bmatrix} F_Z{}^1 \\ F_Z{}^2 \\ F_Z{}^3 \\ F_Z{}^4 \end{bmatrix} a_{i,j}^{f_3}(\theta) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{i,j}^1(\theta) \\ \varepsilon_{i,j}^2(\theta) \\ \varepsilon_{i,j}^3(\theta) \\ \varepsilon_{i,j}^4(\theta) \end{bmatrix} \qquad (28)$$

donde $F_Z{}^e$ es el valor medio del esfuerzo aplicado durante el escalón *e* y $\varepsilon_{i,j}{}^e(\theta)$ es el valor medio de la deformación en el punto de medida *j* de la circunferencia *i* durante el escalón *e*. En la imagen de la izquierda de la FIG. 18 se muestran las funciones de influencia del esfuerzo F_Z sobre la señales de deformación obtenidas en la primera circunferencia, mientras que la imagen de la derecha de la FIG. 18 muestra las funciones de influencia del esfuerzo F_Z sobre las señales de deformación de la segunda circunferencia. El resto de funciones de influencia se pueden obtener siguiendo un procedimiento similar.

Para cada posición angular de la rueda θ en la que se haya obtenido valores de las funciones de influencia, se debe obtener una matriz **D** mediante las combinaciones de

funciones de influencia expresadas en las ecuaciones (21)-(24). La matriz **D** que se vaya a obtener depende de la composición del vector **e**. Como se ha descrito con anterioridad, para llevar a cabo el método expuesto, es necesario obtener al menos tres señales del *tipo 1* ($n_{S1}+ n_{S2}\geq 3$) y al menos tres señales del *tipo 2* ($n_{A1}+ n_{A2}\geq 3$) entre las dos circunferencias. Suponiendo que todas las señales ($E_{S1,i}$, $E_{A1,i}$, $E_{S2,i}$ y $E_{A2,i}$) se vayan a calcular en las dos circunferencias para obtener los seis esfuerzos, el vector **e** tendría la forma expresada en la ecuación (15). En este caso, la matriz **D** se debería obtener combinando las funciones de influencia de cada esfuerzo sobre las deformaciones de la misma circunferencia según las ecuaciones (25) y (26).

El proceso de calibración se termina con la obtención de la matriz **C**. Dicha matriz se puede obtener como la pseudoinversa de Moore-Penrose de **D**. Por ejemplo, en la FIG. 19 se observa cómo varía el elemento de la fila 2 y de la columna 4 de la matriz **C** con el cambio de la posición angular de la rueda.

Para llevar a cabo el método expuesto en esta invención, se deben procesar las señales obtenidas en los puntos de medida señalados en la FIG. 16. Para ello, en cada instante de tiempo en el que se quieran obtener los esfuerzos generados en el contacto entre el neumático y la calzada, se obtendría en primer lugar el vector de señales del *tipo 1* y del *tipo 2* de la ecuación (15) mediante las combinaciones de señales de deformación de los puntos de medida expresadas en las ecuaciones (6)-(13). En un segundo paso se obtendrían los esfuerzos en el contacto neumático-calzada combinando las señales del vector (15) con coeficientes calculados interpolando los elementos de la matriz **C** obtenida mediante el procedimiento de calibración descrito para la posición angular θ en la que se encuentre la rueda, tal y como se muestra en la ecuación (17). Se recomienda que las combinaciones de señales de deformación de los puntos de medida mediante las ecuaciones (6)-(13), y la combinación expresada en la ecuación (17) se realicen en la rueda mediante la utilización de un microcontrolador y se transmitan directamente los esfuerzos en el contacto neumático-calzada mediante un sistema de telemetría a un ordenador en el vehículo.

REIVINDICACIONES

1. Método de estimación de los esfuerzos generados por el contacto de un neumático con la calzada que comprende los pasos de:

– obtener señales de deformación mediante una pluralidad de sensores de deformación distribuidos siguiendo una pluralidad de puntos de medida;

– procesar las señales de deformación como señales de fuerzas y señales de momentos generadas en el contacto entre el neumático y la calzada;

caracterizado por que los puntos de medida están distribuidos siguiendo dos circunferencias concéntricas respecto del centro de la llanta, con al menos cuatro puntos de medida distribuidos de forma que estén espaciados ángulos equidistantes dentro de cada circunferencia **y por que** el paso de procesar las señales comprende combinar de forma lineal las señales de deformación de los puntos de medida de las distintas circunferencias mediante coeficientes que dependen de la posición angular de los puntos y del número de sensores, obtenidos mediante calibración previa.

2. Método según la reivindicación 1, donde los puntos de medida se seleccionan de modo que coincidan con los puntos de intersección entre las circunferencias y los planos de simetría de la llanta.

3. Método según las reivindicaciones 1 o 2, donde se coloca un sensor de deformación en cada punto de medida de una misma circunferencia; y la señal de deformación del punto de medida se corresponde con la deformación generada en el punto en el que se coloca el sensor.

4. Método según la reivindicación 3, donde los sensores se acondicionan en un 1/4 de Puente de Wheatstone.

5. Método según las reivindicaciones 1 o 2, donde se coloca un par de sensores por punto de medida de una misma circunferencia, de modo que los dos sensores del mismo par estén situados en puntos simétricos con respecto al plano que contiene al eje de la rueda y a la recta que une el centro de la rueda con el punto de medida y la señal de deformación del punto de medida se corresponde con la suma de las señales de deformación en los puntos en los que se colocan los sensores.

6. Método según la reivindicación 5, donde los sensores del par de sensores colocados en puntos simétricos con respecto al mismo plano que contiene al eje de la rueda y a la recta que une el centro de la rueda con el punto de medida se acondicionan en 1/2 de Puente de Wheatstone.

7. Método según las reivindicaciones 3 o 5, donde las señales de deformación de la misma circunferencia se combinan linealmente entre sí mediante unos coeficientes que dependen del número de puntos de medida utilizados y de la posición angular de los mismos.

8. Método según la reivindicación 7, donde se calculan:

- al menos tres señales entre las dos circunferencias, estando cada una de ellas caracterizada por que su componente continua es igual al valor medio de la amplitud del primer o del segundo término en coseno de las deformaciones de una de las circunferencias (denominadas respectivamente $E_{S1,i}$ y $E_{S2,i}$) .

- y al menos otras tres señales entre las dos circunferencias, estando cada una de ellas caracterizada por que su componente continua es igual al valor medio de la amplitud del primer o del segundo término en seno de las deformaciones de una de las circunferencias (denominadas respectivamente $E_{A1,i}$ y $E_{A2,i}$).

9. Método según la reivindicación 8, donde el proceso de calibración consiste en hallar una matriz **C** que contiene los coeficientes que se utilizan para obtener los esfuerzos en el contacto neumático-calzada mediante la combinación de señales $E_{S1,i}$, $E_{S2,i}$, $E_{A1,i}$ y $E_{A2,i}$ obtenidas en las tres circunferencias, de modo que,

$$\mathbf{f} = \mathbf{C}\mathbf{e} \qquad (29)$$

siendo **f** el vector que contiene todos los esfuerzos ordenados de manera arbitraria y **e** el vector que contiene todas las señales $E_{S1,i}$, $E_{S2,i}$, $E_{A1,i}$ y $E_{A2,i}$ calculadas en las tres circunferencias ordenadas de modo arbitrario,

y comprende los pasos de:

- obtener valores de las funciones de influencia de cada esfuerzo sobre las deformaciones en cada punto de medida cuando la rueda se encuentra en diferentes

posiciones angulares, donde la función de influencia de un determinado esfuerzo en un determinado punto de medida es la deformación de dicho punto de medida causada cuando dicho esfuerzo tiene un valor unitario y el resto de esfuerzos son iguales a cero;

– calcular la matriz **D** en las posiciones angulares en las que se tengan valores de las funciones de influencia mediante la combinación lineal de dichos valores con coeficientes que dependen del número de puntos de medida de cada circunferencia y de la posición angular de estos, donde el elemento de la fila *v* y la columna *w* de dicha matriz, $d_{v,w}$, tiene la siguiente forma:

$$d_{v,w} = \frac{2}{N_{Pi}} \sum_{j=1}^{N_{Pi}} \left(a_{i,j}^{f_w} \cdot \cos\left(\alpha_i + (j-1)\frac{2\pi}{N_{Pi}} \right) \right) \qquad \text{si} \quad e_v = E_{S1,i}$$

$$d_{v,w} = \frac{2}{N_{Pi}} \sum_{j=1}^{N_{Pi}} \left(a_{i,j}^{f_w} \cdot \cos\left(2\alpha_i + 2\cdot(j-1)\frac{2\pi}{N_{Pi}} \right) \right) \qquad \text{si} \quad e_v = E_{S2,i}$$

$$d_{v,w} = \frac{2}{N_{Pi}} \sum_{j=1}^{N_{Pi}} \left(a_{i,j}^{f_w} \cdot \sin\left(\alpha_i + (j-1)\frac{2\pi}{N_{Pi}} \right) \right) \qquad \text{si} \quad e_v = E_{A1,i}$$

$$d_{v,w} = \frac{2}{N_{Pi}} \sum_{j=1}^{N_{Pi}} \left(a_{i,j}^{f_w} \cdot \sin\left(2\alpha_i + 2\cdot(j-1)\frac{2\pi}{N_{Pi}} \right) \right) \qquad \text{si} \quad e_v = E_{A2,i}$$

siendo *i* el número asignado a la circunferencia, *j* el número asignado al punto de medida, N_{Pi} el número de puntos de medida de la circunferencia *i*, α_i el ángulo de un plano de medida tomado como referencia para la circunferencia *i* con respecto al plano de aplicación de los esfuerzos, f_w es el elemento en la posición *w* del vector de esfuerzos **f** y $a_{i,j}^{f_w}$ es la función de influencia del esfuerzo f_w sobre la deformación en el punto de medida *j* de la circunferencia *i*;

– calcular la matriz **C** de coeficientes a partir de la matriz **D** en las posiciones angulares en las que se tengan valores de las funciones de influencia, donde la matriz **C** es la inversa por la izquierda de la matriz **D**.

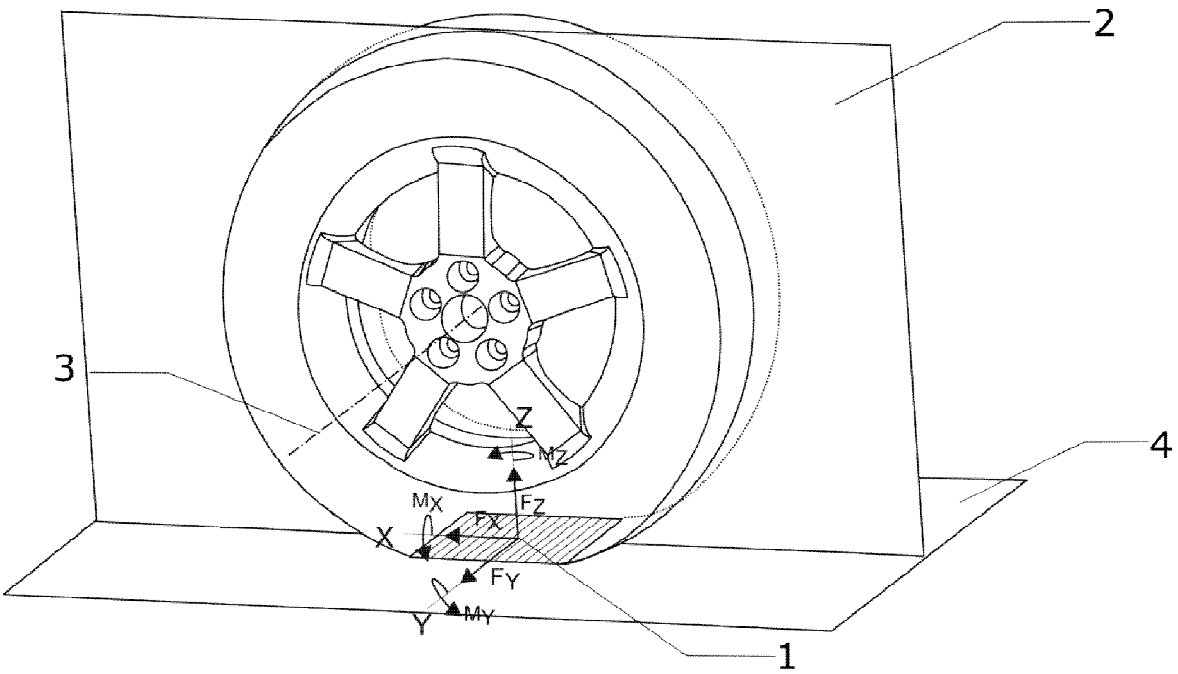
10. Método según la reivindicación 9, caracterizado por que para la obtención del valor de las funciones de influencia de un determinado esfuerzo sobre las deformaciones en una determinada posición angular de la rueda se aplica dicho esfuerzo de manera aislada o simultáneamente con otros esfuerzos en el contacto entre el neumático y la superficie de rodadura con la rueda situada en dicha posición angular en al menos tantos escalones como esfuerzos se apliquen al mismo tiempo.

11. Método según la reivindicación 9, donde los valores de los coeficientes de la matriz **C** en posiciones angulares de la rueda en las que no se tengan valores de las funciones de influencia se obtienen mediante la interpolación de los valores de dichos coeficientes en las posiciones angulares en las que sí se hayan obtenido valores de las funciones de influencia.

12. Método según la reivindicación 9, caracterizado por que se calcula el número de condición de la matriz **C** o **D** para varios emplazamientos posibles de las circunferencias y puntos de medida, y se escogen como circunferencias y puntos de medida definitivos aquellos que den como resultado una matriz **C** o **D** con el menor número de condición de todas las posibilidades analizadas.

13. Método según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que los sensores de deformación se colocan en la dirección radial.

14. Método según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde los sensores de deformación son galgas extensométricas.



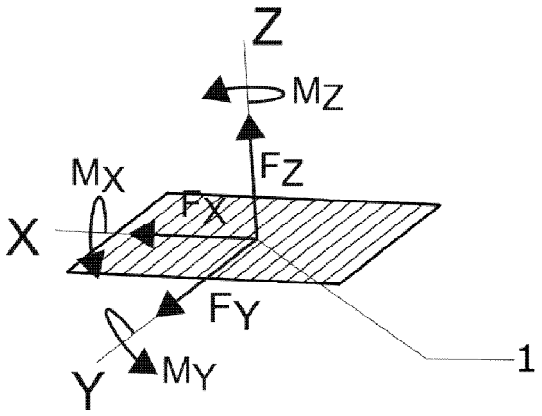


FIG. 1

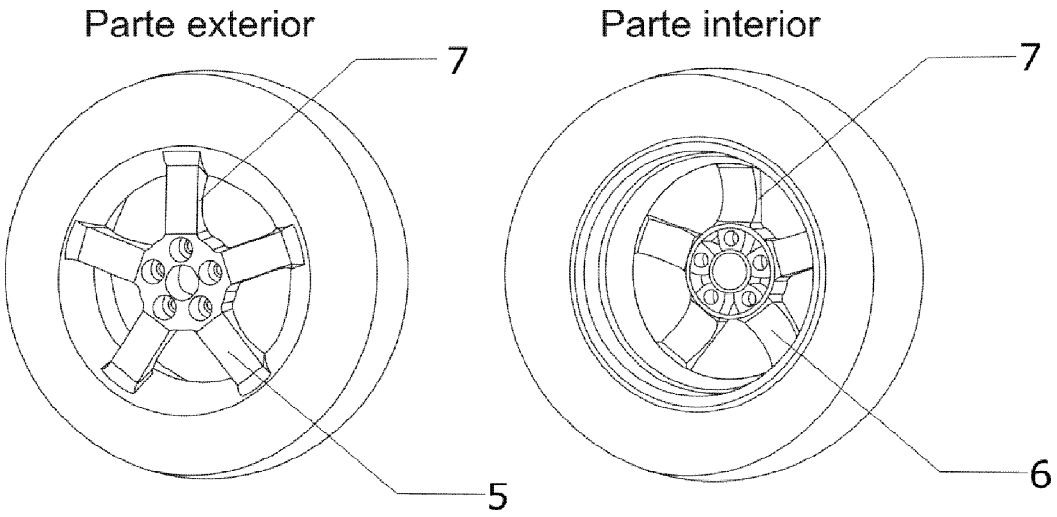


FIG. 2

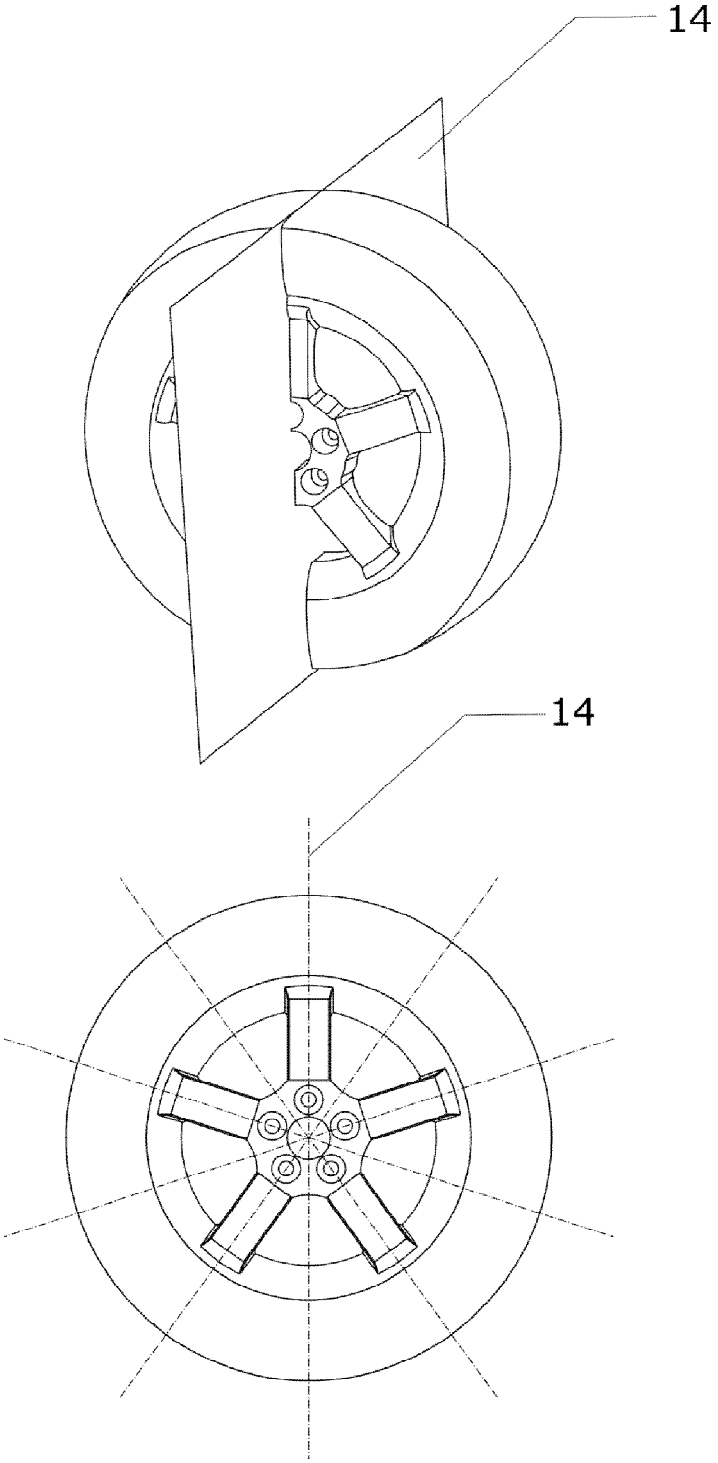


FIG. 3

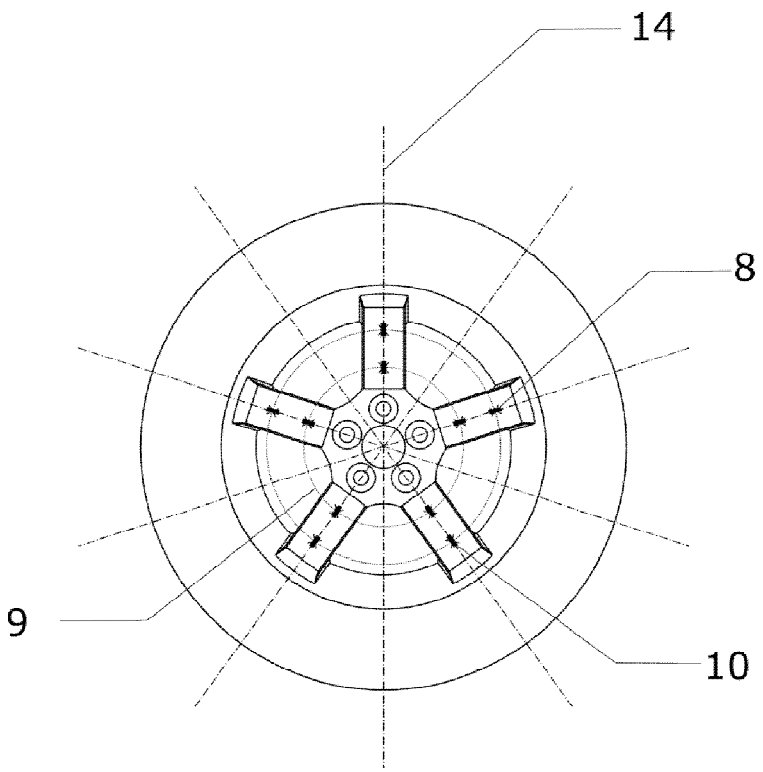


FIG. 4

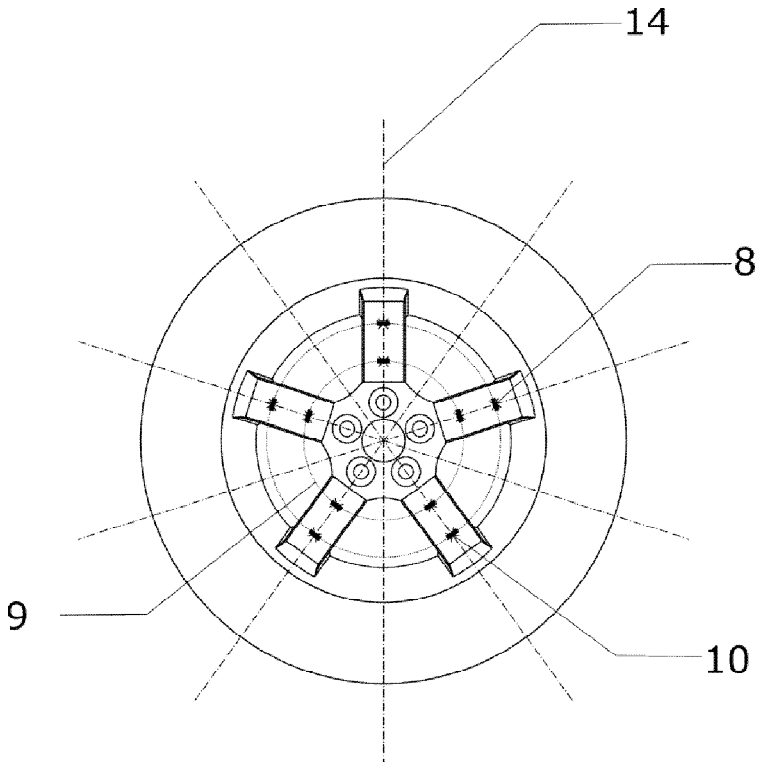


FIG. 5

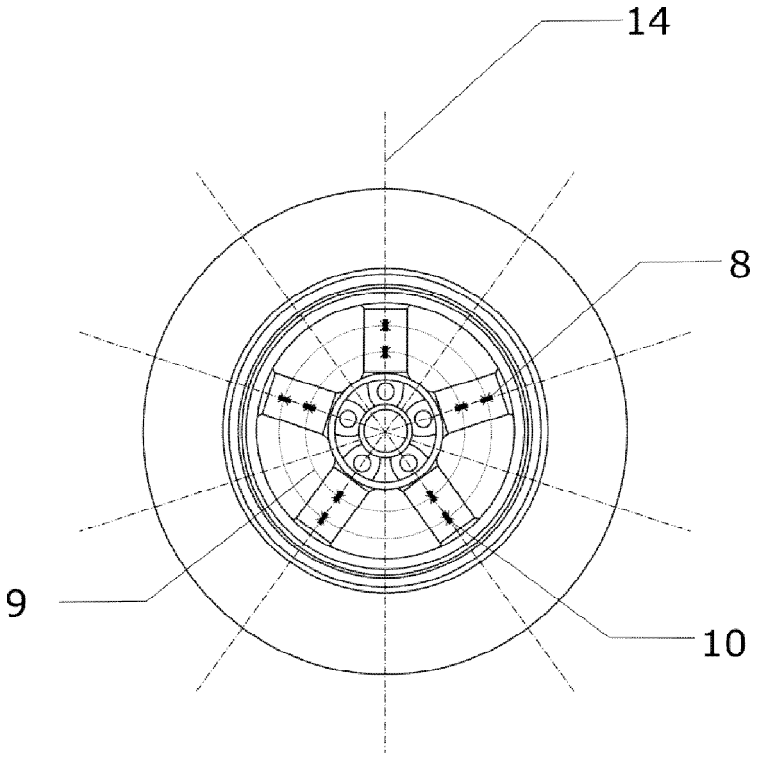


FIG. 6

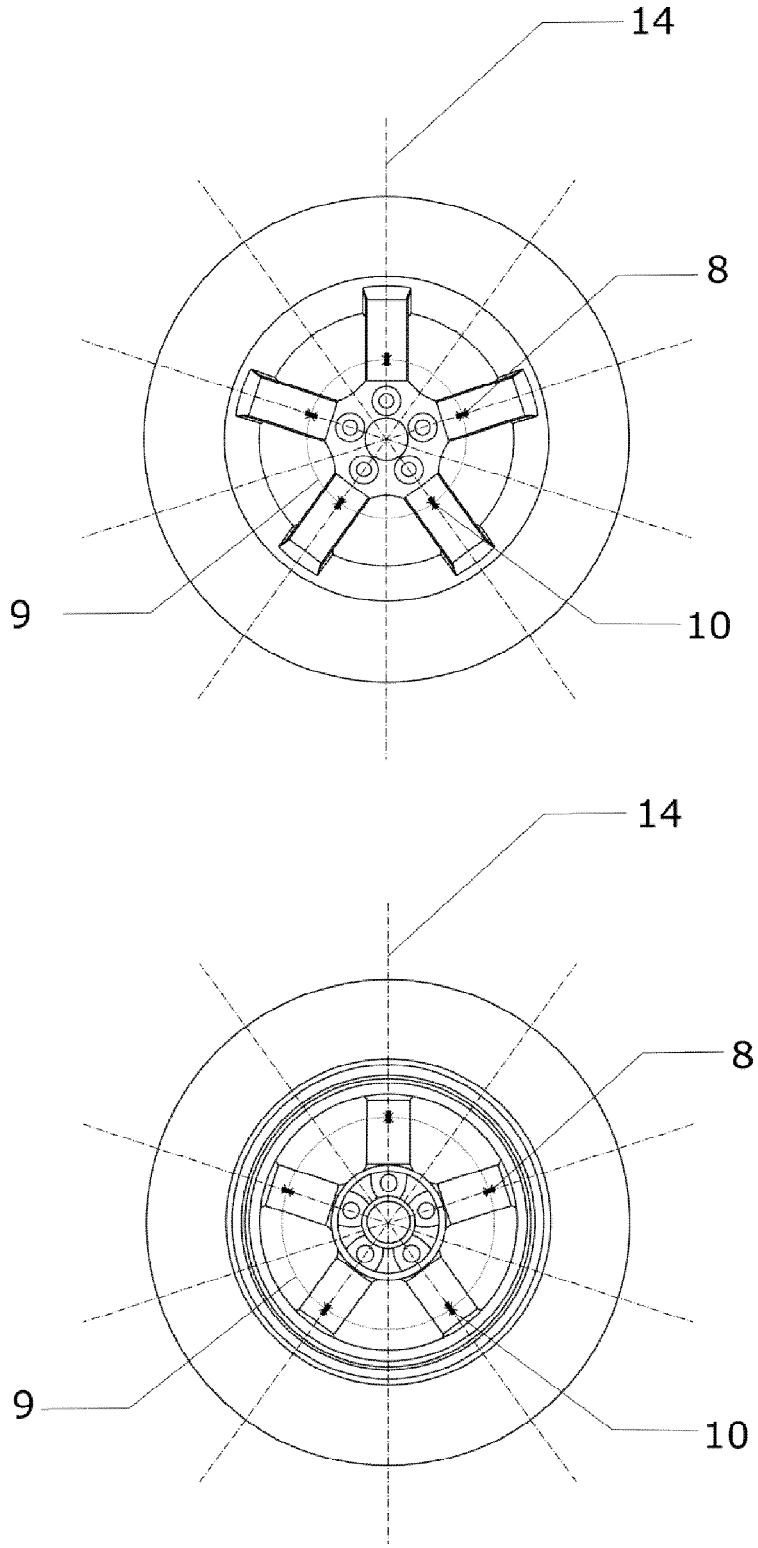


FIG. 7

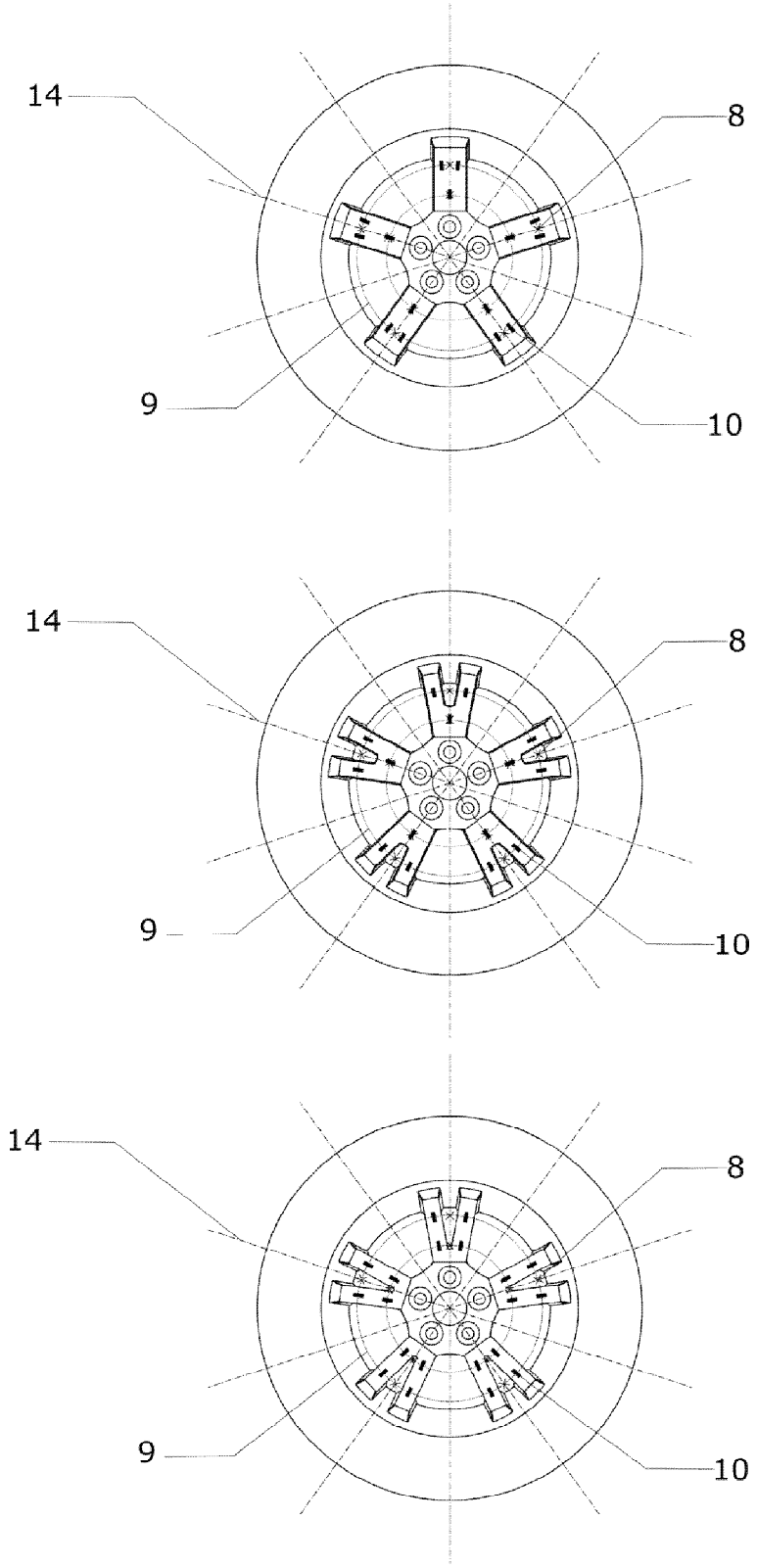


FIG. 8

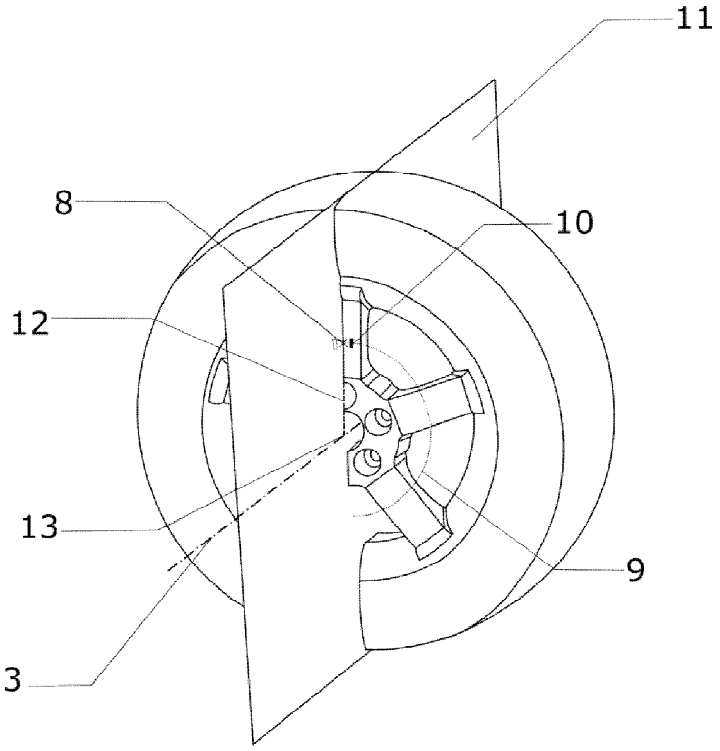


FIG. 9

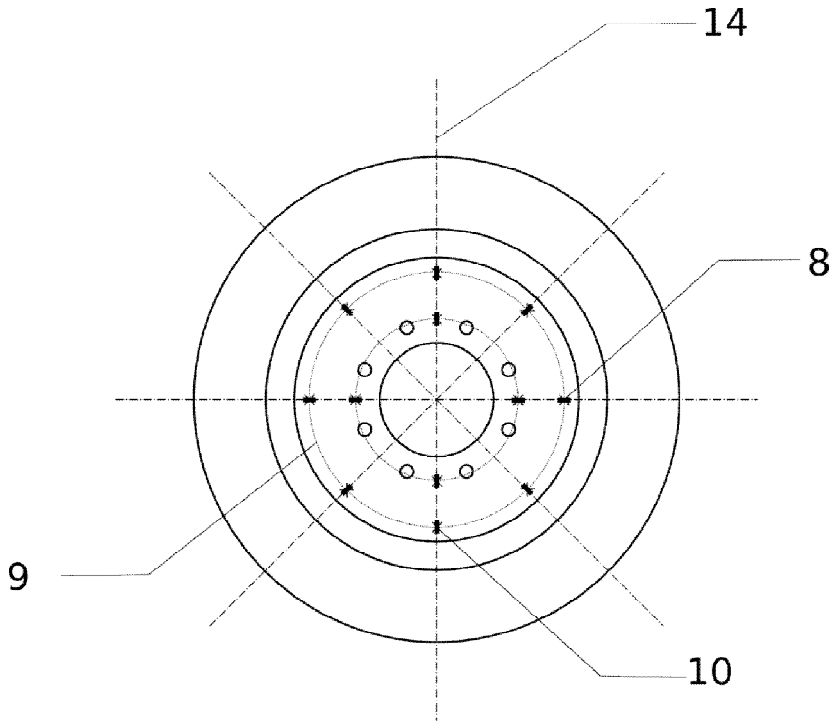


FIG. 10

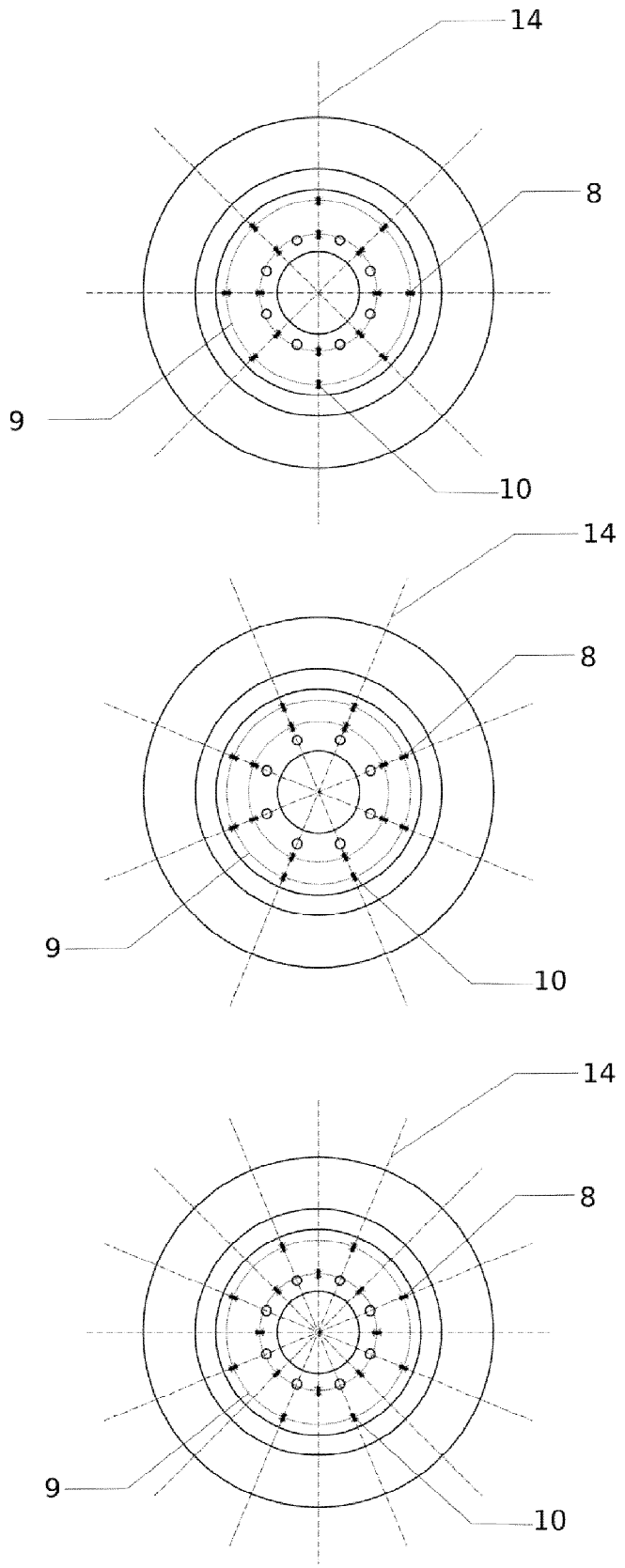


FIG. 11

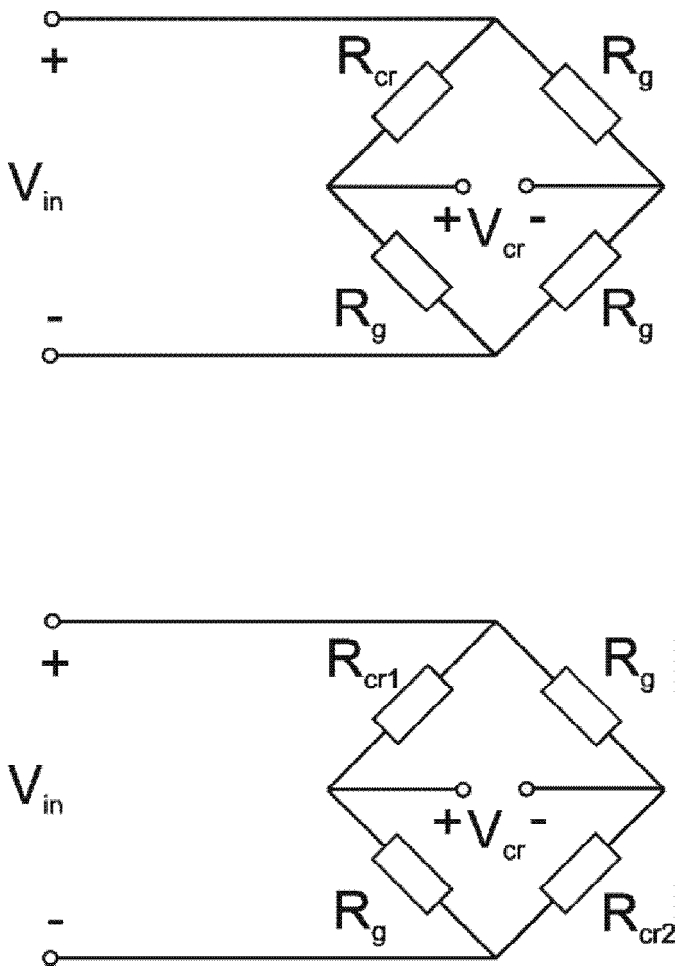


FIG. 12

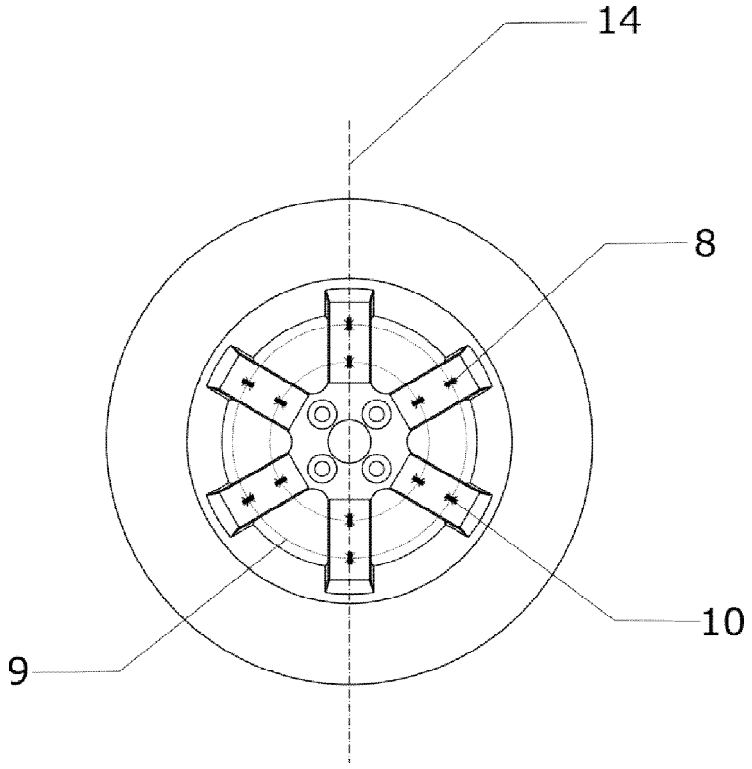


FIG. 13

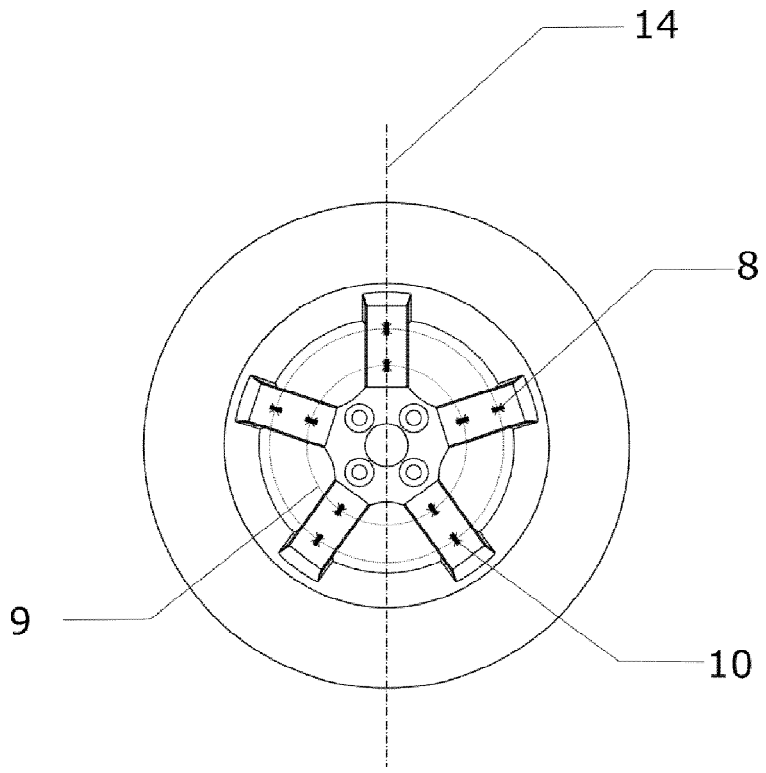


FIG. 14

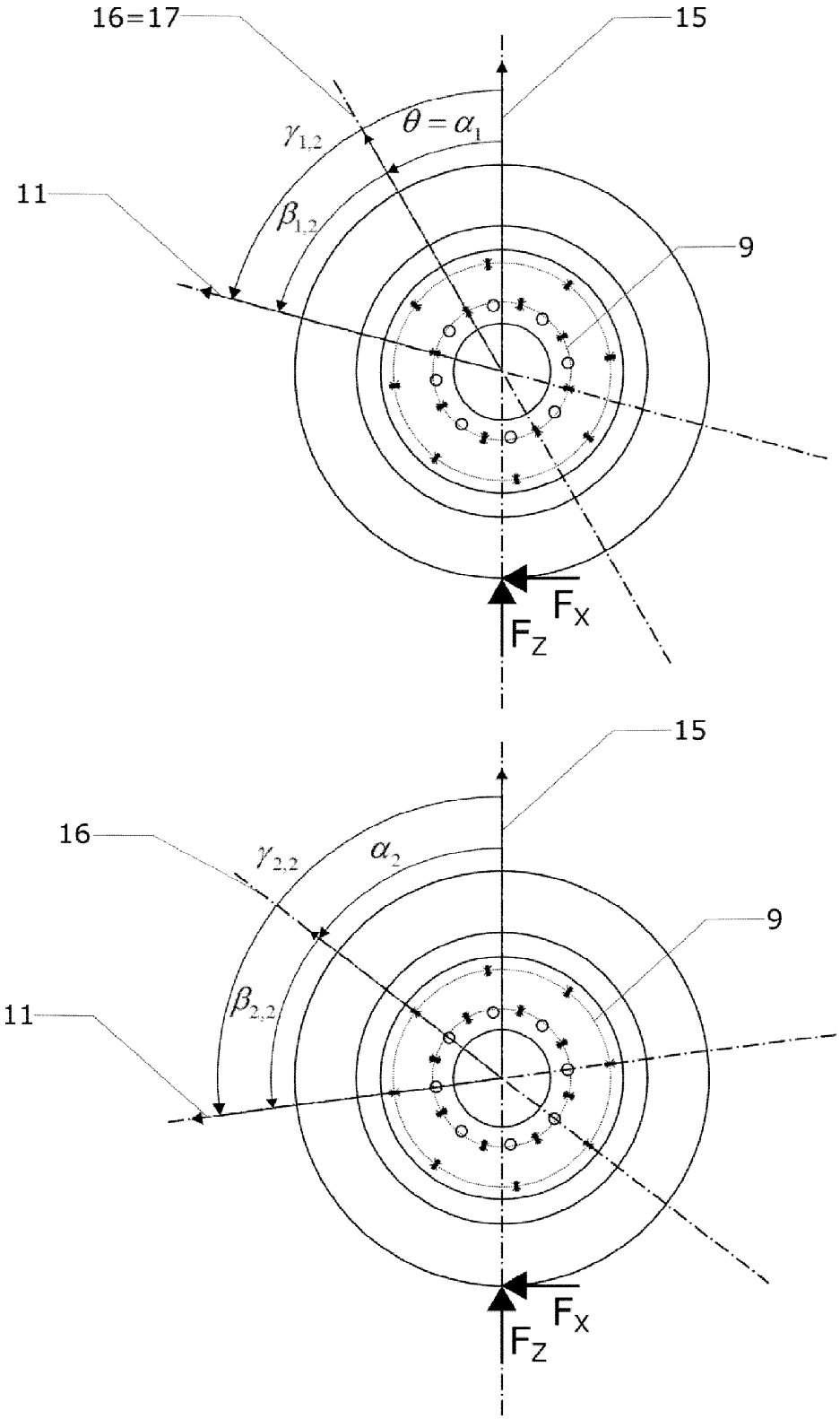

16=17
15
$\theta = \alpha_1$
$\gamma_{1,2}$
$\beta_{1,2}$
11
9
F_X
F_Z
15
16
$\gamma_{2,2}$
α_2
9
$\beta_{2,2}$
11
F_X
F_Z

FIG. 15

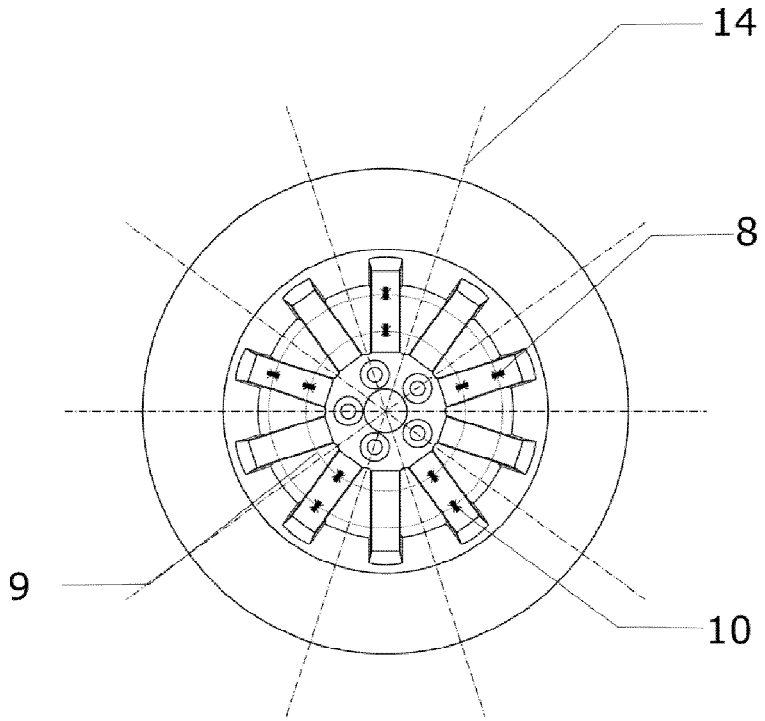


FIG. 16

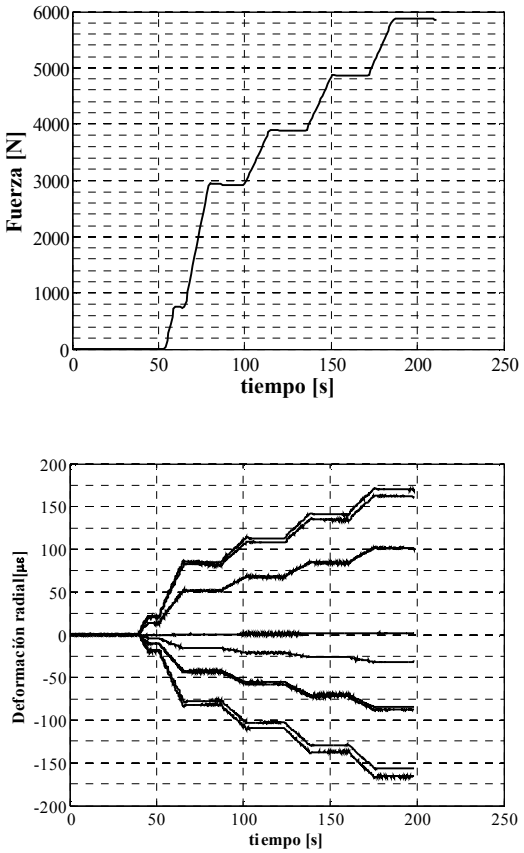


FIG. 17

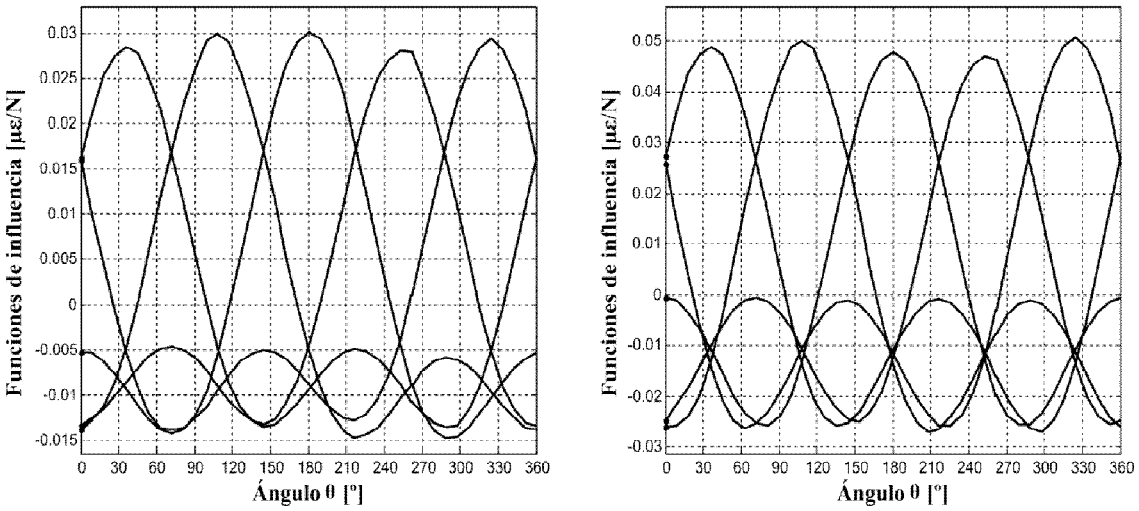

Funciones de influencia [με/N]
0.03
0.025
0.02
0.015
0.01
0.005
0
-0.005
-0.01
-0.015
0 30 60 90 120 150 180 210 240 270 300 330 360
Ángulo θ [º]
Funciones de influencia [με/N]
0.05
0.04
0.03
0.02
0.01
0
-0.01
-0.02
-0.03
0 30 60 90 120 150 180 210 240 270 300 330 360
Ángulo θ [º]

FIG. 18

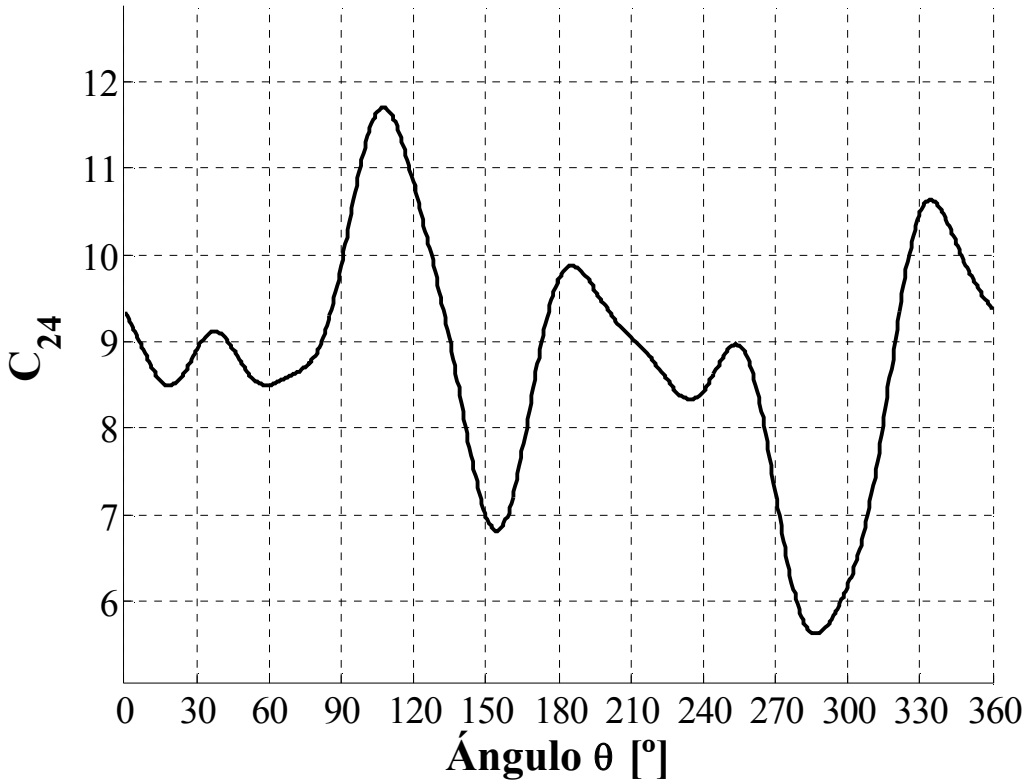

12
11
10
9
8
7
6
C_{24}
0 30 60 90 120 150 180 210 240 270 300 330 360
Ángulo θ [º]

FIG. 19

OFICINA ESPAÑOLA
DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(21) N.º solicitud: 201630032

(22) Fecha de presentación de la solicitud: 15.01.2016

(32) Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

(51) **Int. Cl. :** ***G01M17/02*** (2006.01)

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	(56) Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	ES 2363400 A1 (UNIV MADRID POLITECNICA) 02.08.2011, páginas 2-16.	1-14
A	US 2009125251 A1 (CARETTA RENATO et al.) 14.05.2009, párrafos [0001]-[0118].	1-14
A	EP 1426259 A1 (SUMITOMO RUBBER IND) 09.06.2004, párrafos [0001]-[0019].	1-14
A	US 5894094 A (KUCHLER MAXIMILIAN et al.) 13.04.1999, columna 1, línea 5 – columna 11, línea 43.	1-14
A	US 4448083 A (HAYASHI JUNICHI) 15.05.1984, columna 1, línea 5 – columna 5, línea 23.	1-14

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia
Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría
A: refleja el estado de la técnica
O: referido a divulgación no escrita
P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud
E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

El presente informe ha sido realizado

☒ para todas las reivindicaciones ☐ para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe	Examinador	Página
31.03.2016	B. Tejedor Miralles	1/4

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

G01M

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC, WPI, Bases de datos de patentes de texto completo, literatura no patente, internet

Fecha de Realización de la Opinión Escrita: 31.03.2016

Declaración

Novedad (Art. 6.1 LP 11/1986)	Reivindicaciones	1-14	**SI**
	Reivindicaciones		**NO**
Actividad inventiva (Art. 8.1 LP11/1986)	Reivindicaciones	1-14	**SI**
	Reivindicaciones		**NO**

Se considera que la solicitud cumple con el requisito de aplicación industrial. Este requisito fue evaluado durante la fase de examen formal y técnico de la solicitud (Artículo 31.2 Ley 11/1986).

Base de la Opinión.-

La presente opinión se ha realizado sobre la base de la solicitud de patente tal y como se publica.

1. Documentos considerados.-

A continuación se relacionan los documentos pertenecientes al estado de la técnica tomados en consideración para la realización de esta opinión.

Documento	Número Publicación o Identificación	Fecha Publicación
D01	ES 2363400 A1 (UNIV MADRID POLITECNICA)	02.08.2011
D02	US 2009125251 A1 (CARETTA RENATO et al.)	14.05.2009
D03	EP 1426259 A1 (SUMITOMO RUBBER IND)	09.06.2004
D04	US 5894094 A (KUCHLER MAXIMILIAN et al.)	13.04.1999
D05	US 4448083 A (HAYASHI JUNICHI)	15.05.1984

2. Declaración motivada según los artículos 29.6 y 29.7 del Reglamento de ejecución de la Ley 11/1986, de 20 de marzo, de Patentes sobre la novedad y la actividad inventiva; citas y explicaciones en apoyo de esta declaración

Reivindicación 1:

Se considera como estado de la técnica más próximo al objeto de la invención el documento D01. Dicho documento divulga un método de estimación de los esfuerzos generados por el contacto de un neumático con la calzada que comprende los pasos de:
 obtener señales de deformación mediante una pluralidad de sensores de deformación distribuidos siguiendo una pluralidad de puntos de medida;
 procesar las señales de deformación como señales de fuerzas y señales de momentos generadas en el contacto entre el neumático y la calzada.

Se diferencia de la primera reivindicación en que los puntos de medida se distribuyen siguiendo dos circunferencias concéntricas respecto del centro de la llanta, con al menos cuatro puntos de medida distribuidos de forma que estén espaciados ángulos equidistantes dentro de cada circunferencia y en que el paso de procesar las señales comprende combinar de forma lineal las señales de deformación de los puntos de medida de las distintas circunferencias mediante coeficientes que dependen de la posición angular de los puntos y del número de sensores, obtenidos mediante calibración previa.

El efecto técnico que se consigue con estas características técnicas es corregir los errores derivados del posicionado de las galgas extensiométricas en cualquier tipo de llanta. El problema técnico a resolver es cómo reducir el error en la medición de los esfuerzos en el contacto neumático-calzada.

No se ha encontrado en el estado de la técnica ningún documento que contenga todas las características técnicas de la primera reivindicación, por lo que dicha reivindicación presentaría novedad y actividad inventiva según los artículos 6.1 y 8.1 de la ley de patentes 11/1986.

Reivindicaciones dependientes 2-14:

En ninguno de los documentos citados, que reflejan el estado de la técnica anterior más próximo al objeto de la invención, se han encontrado presentes todas las características técnicas que se definen en la reivindicación 1 de la solicitud. Así mismo, se considera que las características técnicas diferenciales no parecen derivarse de una manera evidente de ninguno de los documentos citados, ni de manera individual ni mediante una combinación evidente entre ellos. Por ello, la reivindicación independiente 1, y por consiguiente, todas sus dependientes 2-14, satisfarían los requisitos de novedad y actividad inventiva según los artículos 6.1 y 8.1 de la ley de patentes 11/1986. No obstante, los elementos técnicos para llevar a cabo las medidas galgas extensiométricas y puentes de Wheatstone son ampliamente conocidos y utilizados para el mismo propósito).

Otros documentos:

Los documentos D02-D05 divulgan distintos métodos de estimación de los esfuerzos generados por el contacto de un neumático con la calzada, que se diferencian en las consideraciones técnicas sobre la distribución de los puntos de medida y la forma de combinar las señales de deformación obtenidas.