

El Neumático Conectado y Sostenible: I-ECOTIRE

Daniel García-Pozuelo Ramos¹, Ignacio Requena-Rodríguez², María Fernanda Mendoza-Petit¹, Miguel Angel Martínez-Casanova³, Juana Abenojar-Buendía³, Carolina Alvarez-Caldas¹, Jose Antonio Calvo-Ramos¹

¹Depto. Ing. Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid, España. Email: dgramos@ing.uc3m.es, mmendoza@ing.uc3m.es, calvarez@ing.uc3m.es, jacalvo@ing.uc3m.es

²Advantaria S.L., España. Email: idi@advantaria.com

³Depto. Ciencia e Ing. Materiales, Universidad Carlos III de Madrid. Email: mamc@ing.uc3m.es, abenojar@ing.uc3m.es

Resumen

A pesar del enorme potencial de los neumáticos para proporcionar información del estado de la carretera, de la capacidad de frenado, tracción o giro; actualmente son elementos pasivos, desligados de los sistemas de asistencia y/o automatización de la conducción. Asimismo, su fabricación, uso y reciclado tiene un importante impacto medioambiental, siendo prioritario el desarrollo de materiales alternativos en sus componentes y mejoras relativas a su ciclo de vida. Por todo ello, en este artículo se propone implementar un nuevo concepto de neumático mixto que posibilite el uso de nuevos materiales en carcasa y banda de rodadura, y facilite la instalación de sensores en su interior, permitiendo reducir el impacto medioambiental y una mejor implementación del neumático inteligente. Este nuevo concepto de neumático, que se presenta y evalúa en este estudio, cumple con esta nueva estructura y sirve de prueba de concepto para desarrollos posteriores: iECOTIRE.

Palabras clave: neumático inteligente, neumático ecológico, neumático mixto, iECOTIRE.

Abstract

Despite the enormous potential of tires to provide information on the state of the road, the ability to brake, traction or turn; currently they are passive elements, detached from the assistance systems and/or driving automation. Likewise, its manufacture, use and recycling have a significant environmental impact, with the development of alternative materials in its components and improvements related to its life cycle being a priority. For all these reasons, in this paper it is proposed to implement a new concept of mix-tire that allows the use of new materials in the tire case and tread band, and facilitates the installation of sensors, allowing to reduce the environmental impact and a better implementation of the intelligent tire. This new tire concept, which is presented and evaluated in this study, complies with this new structure and serves as proof of concept for subsequent developments: iECOTIRE.

Keywords: intelligent tire, ecological tire, mix tire, iECOTIRE.

1. Introducción

En los últimos años el interés por los neumáticos ha ido en aumento, principalmente debido al impacto que tienen en el confort, rendimiento, consumo de combustible, emisiones contaminantes y seguridad de los vehículos. Éste último es el principal motivo para desarrollar un neumático que forme parte de los sistemas de control activo del vehículo y no sea simplemente un elemento pasivo, mejorando además el tráfico por carretera. Este propósito, con todo lo que conlleva, se ha englobado en los últimos años en el término “neumático inteligente”.

Debido a las características del contacto neumático-calzada, la relación entre las condiciones de trabajo y la adherencia solicitada por el neumático no es lineal. Como consecuencia, controlar el riesgo de deslizamiento del mismo en tiempo real y evitar la pérdida de control del vehículo resulta tremendamente complejo cuando las condiciones dinámicas son muy exigentes. Aun así, una conducción prudente y sin maniobras bruscas no garantiza evitar tener un accidente, ya que controlar la distancia de frenado en una situación crítica o prever el comportamiento del vehículo cuando la calzada está en mal estado debido a la presencia de agua, barro, hielo o aceite es algo difícil de conseguir con los sistemas actuales. En situaciones

de paso por curva el control del vehículo resulta aún más complicado, en especial si se combinan condiciones de aceleración o frenado, sea cual sea el estado de la calzada. Desde este punto de vista resulta un objetivo prioritario para la seguridad vial la estimación de la adherencia solicitada en cada instante y del valor máximo alcanzable. En general, el objetivo último de las investigaciones realizadas sobre el neumático inteligente es

mejoras en ese ámbito, reduciendo su impacto ecológico y en la salud.

El neumático emite importantes cantidades de gases de efecto invernadero durante su fabricación [4], pero además es uno de los principales generadores de microplásticos a nivel global [5-8]. El desgaste que se produce en la banda de rodadura durante su uso genera estas partículas de alto impacto medioambiental, siendo un fenómeno inherente al funcionamiento de los



Figura 1. Potenciales beneficios del neumático inteligente. Fuente: elaboración propia.

monitorizar en tiempo real los parámetros que influyen en el funcionamiento del neumático y en la dinámica global del vehículo, haciendo hincapié en la estimación de la adherencia solicitada por el neumático. La estimación de adherencia solicitada se puede obtener a partir de distintos parámetros como son: las fuerzas transmitidas en el contacto neumático-calzada, la longitud de la huella de contacto, el ángulo de deriva, la fuerza normal en el contacto, las condiciones de la calzada, etc. Sin embargo, muchas de las estrategias de medida y estimación empleadas hasta el momento (acelerómetros, sensores de ondas acústicas, sensores ópticos, etc.) no proporcionan información suficiente sobre los parámetros dinámicos y el desempeño del neumático o resultan demasiado costosas para ser implementadas en neumáticos [1-3].

Con la monitorización de estos parámetros, el neumático inteligente podría proporcionar información útil a los diferentes sistemas de control activo que actualmente equipan la mayoría de los vehículos, como el ABS (Anti-lock Braking System) o el TCS (Traction Control System), mejorando su rendimiento y ayudando a prevenir accidentes de tráfico. Por tanto, la “inteligencia” del neumático reside en la capacidad de conductores y sistemas de control de aprovechar dicha información.

Los neumáticos actuales presentan un problema de impacto medioambiental muy importante. Esto hace que cualquier desarrollo futuro del neumático, incluyendo el neumático inteligente, deba incluir

mismos.

Esto ha llevado al equipo investigador a identificar las partes del neumático con mayor potencial de mejora y buscar soluciones más sostenibles y que puedan funcionar correctamente con el concepto de neumático instrumentado.

En este artículo se va a explicar el modo en que se está desarrollando un neumático con carcasa y banda de rodadura unidas mecánicamente. Esto permite que los materiales empleados para ambas partes no tengan por qué ser vulcanizables ni presenten una compatibilidad físico-química, ampliando la variedad de materiales que se pueden usar para fabricar bandas de rodadura. De este modo, la banda de rodadura podrá fabricarse con un material sostenible de bajo impacto ecológico. En este sentido, ya hay experiencias con cáscara de arroz [9], diente de león [10], etc. Del mismo modo, la vida útil de la carcasa puede alargarse sustancialmente y albergar multitud de bandas de rodadura, siempre y cuando se proteja convenientemente de la oxidación [11]. Esto último, además, permite alojar toda la instrumentación necesaria para el desarrollo del “neumático inteligente” en un componente de larga duración que podría llegar a acompañar al vehículo en toda su vida útil.

2. Desarrollo tecnológico de un nuevo concepto de neumático: iECOTIRE

El desarrollo del concepto iECOTIRE se ha basado en dos pilares inicialmente independientes: neumático

inteligente y neumático mixto desmontable. La combinación de ambos permite mejorar la sostenibilidad del neumático y dotarlo al mismo tiempo de una instrumentación y conectividad que lo convierta en un elemento activo de los sistemas de asistencia a la conducción de los vehículos. Por este motivo se van a describir los principales avances realizados en ambos ámbitos y el modo en que se relacionarán en un futuro prototipo que aúne ambas tecnologías.

2.1. Avances realizados en el neumático inteligente basado en extensometría

La estimación de parámetros como la presión de inflado, la velocidad de giro o la carga que soporta el neumático resultan de gran utilidad para la estimación de su capacidad para transmitir fuerza al pavimento, ya sea longitudinal o lateral. Dichas fuerzas están relacionadas con la adherencia solicitada y disponible en cada situación, siendo la estimación de adherencia la que ha guiado el desarrollo del neumático inteligente basado en extensometría. Para ello se han utilizado dos prototipos de neumático inteligente. A continuación se explicarán ambos prototipos y los principales resultados alcanzados.

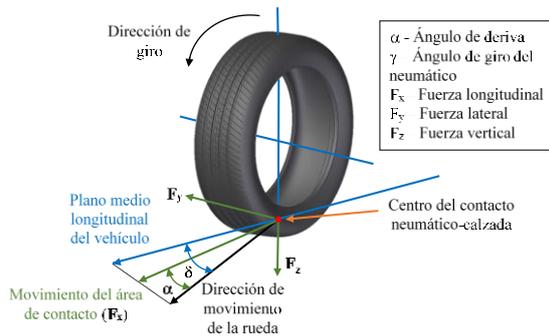


Figura 2. Parámetros estudiados del neumático [12].

2.1.1. Prototipo 1: Metodología

El primero de los prototipos se realizó en colaboración con la Universidad de Birmingham. Para ello se utilizó un neumático DUNLOP SP SPORT 175/505 R13 (sin cámara) específico de monoplaza de Formula Student, pensando en la disponibilidad de este tipo de vehículo como vehículo de ensayo en fases posteriores del estudio. En el neumático se instalaron bandas extensométricas en diferentes puntos de la banda de rodadura para medir la deformación en dirección lateral (ϵ_{y2} - canal 1 y ϵ_{y1} - canal 3) y longitudinal (ϵ_x - canal 2), como se muestra en las Figuras 3 y 4. Las distancias “d” y “l” son 0,040 m y 0,515 m, respectivamente.

La Figura 4b ilustra el tipo de roseta utilizada con bandas extensométricas de 2 mm de longitud y una resistencia de 120 Ω , siendo la resolución de 0,001 $\mu\epsilon$. Para la conexión de éstas al equipo de adquisición se

utilizaron tres válvulas selladas con adhesivo para garantizar la estanqueidad. El equipo de adquisición utilizado fue el SoMat® 2000 Field Computer, el cual se muestra en la Figura 5, fijado a la llanta para la realización de ensayos. Antes de iniciar los ensayos, el neumático fue equilibrado para no modificar su comportamiento dinámico.

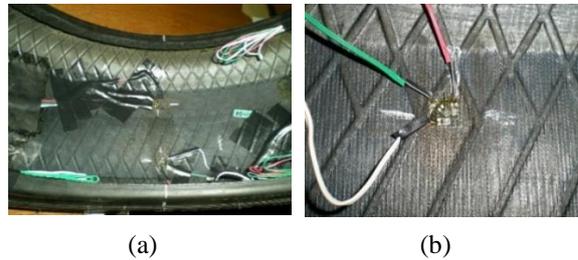


Figura 3. (a) Cableado interior del neumático; (b) roseta adherida a la banda de rodadura.

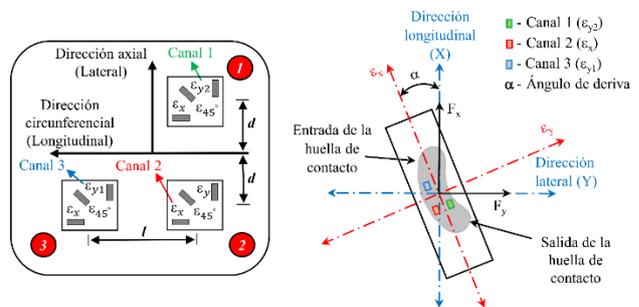


Figura 4. Posicionamiento de las bandas extensométricas.



Figura 5. Equipo de adquisición y acondicionamiento de datos SoMat® 2000 instalado en la llanta.

El neumático instrumentado fue ensayado en un banco de rodillo para las siguientes condiciones de ensayo:

- Presión de inflado: 0,8-1,4 bar;
- Fuerza vertical: 250 N-1000 N;
- Velocidad: 10 km/h-50 km/h;
- Ángulo de deriva: 0°-14°.

Los ensayos realizados han consistido en medir la deformación de la superficie interna de la banda de rodadura variando las condiciones de ensayo para conocer la influencia de éstas en dicha deformación.

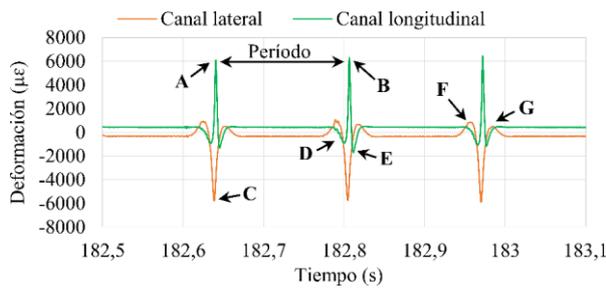


Figura 6. Ejemplo de las curvas de deformación obtenidas en dirección longitudinal y lateral.

2.1.2. Prototipo 1: Resultados

El análisis de datos y las herramientas de estimación han permitido extraer información sobre las curvas de deformación obtenidas y establecer relaciones con las condiciones de trabajo del neumático. Para ello, se han analizado los puntos máximos de deformación a la entrada y salida de la huella de contacto, en el interior de la misma y también en aquellos puntos en los que el sensor está alejado del área de contacto (denominado offset). También se han calcularon los ciclos representativos para cada condición de ensayo, de forma que se pueden comparar los distintos ciclos de forma separada y conocer la influencia de las condiciones de trabajo sobre las curvas de deformación.

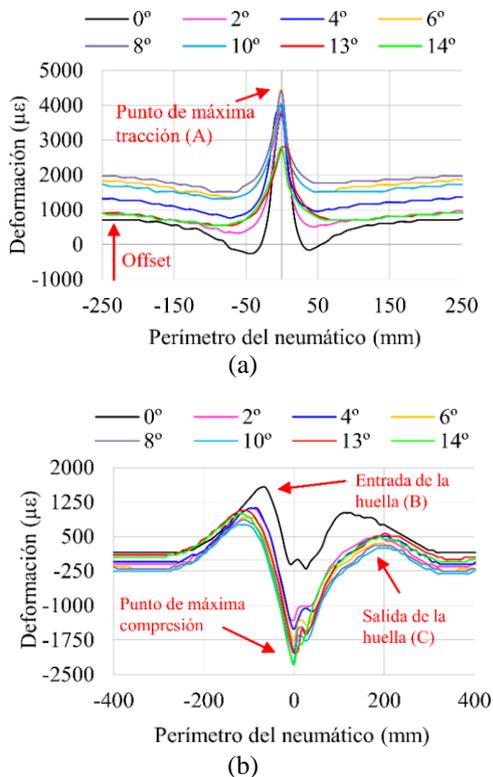


Figura 7. (a) Ejemplo de curvas obtenidas en el canal 2 (ϵ_x); (b) y en el canal 3 (ϵ_{y1}).

La Figura 7 es una muestra de este análisis, donde se puede ver la variación en la deformación registrada tanto longitudinal como lateralmente ante diferentes ángulos de deriva.

A lo largo de diversos estudios, el equipo investigador ha extraído cada vez mayor información de estos datos de deformación del neumático, proponiendo y mejorando estimaciones de parámetros como la presión, la velocidad angular y la carga del neumático [13], el ángulo de deriva y la fuerza lateral [14], la adherencia lateral solicitada [15], el ángulo de caída [16], radio efectivo y longitud de la huella de contacto [17] y, más recientemente, de la adherencia combinada en las direcciones longitudinal y lateral [18]. En último término, esto ha permitido diseñar sistemas de detección del deslizamiento que permiten anticipar el mismo a los sistemas de asistencia a la conducción, como el control de estabilidad o asistentes en tracción y frenado, tal y como se muestra en las Figuras 8 y 9.

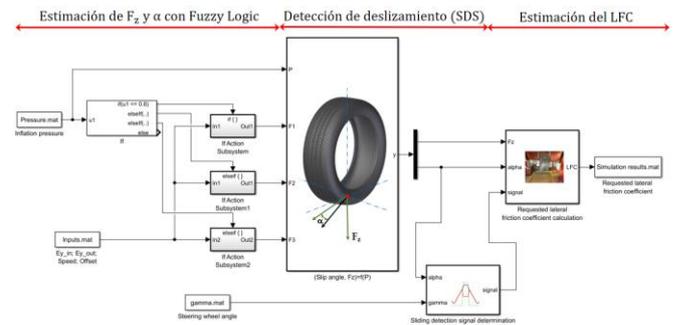


Figura 8. Implementación del Sistema de detección del deslizamiento lateral en MATLAB/Simulink®.

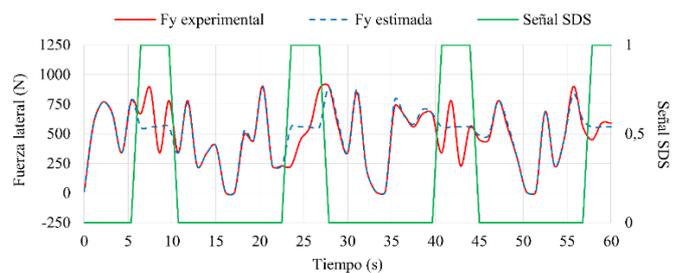


Figura 9. Resultados de simulación de F_y en comparación con los datos experimentales y señal proporcionada por el sistema de detección del deslizamiento (SDS).

Estos resultados han llevado al equipo investigador a seguir avanzando en la instrumentación empleada para reducir el tamaño, peso y coste de los sistemas embarcados en el neumático, fabricando un segundo prototipo.

2.1.3. Prototipo 2: Metodología

Para el segundo prototipo se ha empleado nuevamente un neumático para monoplaza de Formula Student, en este caso se trata de un Avon 175/53 R13, un

neumático tipo slick sin cámara. En este neumático se emplearon bandas extensométricas simples en lugar de rosetas, ya que el objetivo final del neumático instrumentado es instalar los hilos conductores de los sensores embebidos en el propio caucho de la carcasa, durante el proceso de fabricación. Del mismo modo que se incluyen multitud de refuerzos metálicos y textiles en el interior de la carcasa en las etapas previas al vulcanizado, se incluirían estos sensores. De este modo se abarataría el coste de su instalación y los sensores quedarían protegidos en el interior del neumático, en su parte más interna. Esto llevó a la instalación de galgas extensométricas tal y como se puede ver en las figuras 10 y 11.

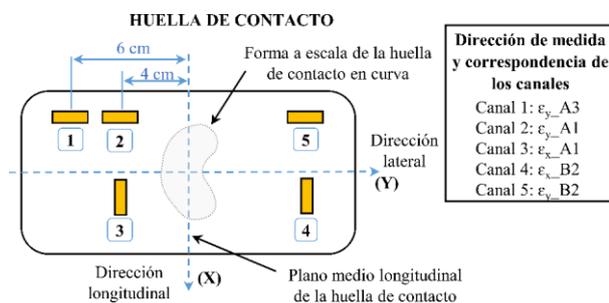


Figura 10. Número de canal, localización y dirección de medida de las galgas extensométricas.

Se observa también en la Figura 10 que la distancia al plano medio longitudinal es diferente para cada canal de medida. De este modo, se estudia la influencia de la distancia de los sensores a dicho plano para conocer la posición más idónea para obtener información.



Figura 11. Sensores instalados bajo la banda de rodadura.

El equipo de adquisición de datos utilizado es el Slice Micro DTS. Su peso y dimensiones lo hacen adecuado para esta aplicación, ya que posibilita instalarlo en el espacio existente entre la llanta y la superficie interna de la banda de rodadura, donde están instalados los sensores. Además, está diseñado para realizar ensayos de forma portátil, por lo que se puede alimentar mediante una batería. Para esta aplicación, la frecuencia de muestreo se fijó en 1000 Hz, mientras que el rango fue de $-12000/12000 \mu\epsilon$, ajustadas a las condiciones de los ensayos que ya habían sido realizadas con el anterior prototipo.

Para instalar el equipo de adquisición y la batería, se mecanizó la llanta, abriendo una ventana para insertar el equipo de adquisición y realizando taladros para la fijación de tornillos, como se muestra en la Figura 12. Además, se fabricó una junta de material gomoso mediante impresión 3D, para lograr la estanqueidad necesaria y no sufrir pérdidas de presión durante los ensayos. Finalmente, cabe destacar que el conjunto se selló mediante juntas de silicona para evitar el paso de aire a través de las uniones metálicas.

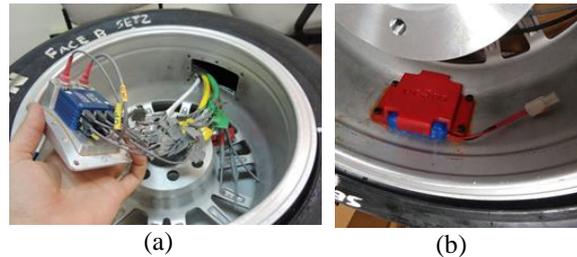


Figura 12. (a) Canales conectados al equipo de adquisición; (b) Batería instalada sobre la llanta.

2.1.4. Prototipo 2: Resultados

La funcionalidad de este nuevo prototipo es idéntica a la del primer prototipo, incluyendo las mejoras obtenidas por reducir el tamaño y peso de la instrumentación. Esto facilita el equilibrado, reduce la variación de masa con respecto a un neumático convencional (sin instrumentar) y, lo que es más importante, ha permitido introducir toda la instrumentación en el interior del neumático. Únicamente se ha mantenido la batería en una zona de la llanta accesible por motivos de facilidad de sustitución, aunque sería posible instalarla en su interior. Ya se está trabajando en sistemas autónomos de alimentación que puedan instalarse en el propio neumático. Algunos de los resultados obtenidos con este nuevo prototipo han sido publicados, mostrando su potencial para el análisis del comportamiento dinámico del neumático ante diferentes ángulos de caída [16] y para diferentes solicitaciones longitudinales y laterales [18].

2.2. Avances realizados en el neumático mixto-desmontable

El otro pilar en el que se fundamenta el iECOTIRE es el diseño de una nueva estructura de neumático que permita separar de un modo sencillo la banda de rodadura de la carcasa. Esto permitiría renovar la banda de rodadura sin necesidad de cambiar el neumático entero ni de vulcanizar ambas partes juntas. Por otra parte, una carcasa de larga duración permitiría alojar todos los sensores y sistemas de instrumentación del neumático inteligente, reduciendo los costes y la cantidad de materiales empleados.

Esta parte del concepto iECOTIRE es de más reciente desarrollo, ya que surge de aplicar nuevas técnicas antipinchazo en los neumáticos, dotándoles de una unión metálica entre la carcasa y la banda de rodadura. A partir de estas primeras experiencias se observa que la facilidad para cambiar la banda de rodadura, con diferentes dibujos para diferentes terrenos, diferentes características mecánicas, etc.; abre la posibilidad de utilizar la carcasa durante mucho más tiempo y de instalar bandas de rodadura fabricadas de muy diversos materiales, algunos de ellos biodegradables.

2.2.1. Prototipo de neumático mixto-desmontable: metodología

Para esta parte de la investigación se diseñó (ver Figura 13) y fabricó (ver Figura 14) un neumático desmontable formado por una carcasa convencional a la que se unieron unos elementos metálicos que crean una capa antipinchazos que facilitaba la incorporación y sustitución de una banda de rodadura. El hecho de incluir estos elementos metálicos, unidos en este caso mediante uniones roscadas (aunque también se han probado uniones remachadas) hace que perdamos la estanqueidad en la carcasa, por lo que fue necesario incluir una cámara hichable de aire en su interior.

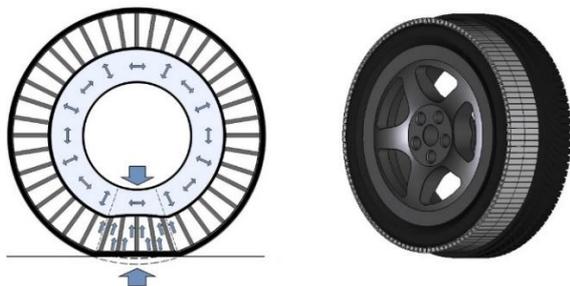


Figura 13. Esquema de funcionamiento, y diseño de prototipos mediante software de diseño y análisis asistido por computador [19]. Fuente: Advantaria/Mixtire.



Figura 14. Imagen del prototipo fabricado sin la banda de rodadura instalada [19,20]. Fuente: Advantaria/Mixtire.

Aunque las principales ventajas pueden estar relacionadas con un uso militar debido a sus

características antipinchazo, las pruebas iniciales de concepto se han realizado en neumáticos de bicicleta.

2.2.2. Resultados obtenidos con el prototipo de neumático mixto-desmontable

El prototipo de neumático mixto-desmontable ha sido montado y probado en una bicicleta.

Los resultados han sido analizados de forma cualitativa, ya que no se ha dispuesto de las herramientas de ensayo que permitan tomar medidas de fuerza transmitida longitudinal y lateralmente, desgaste en la unión entre banda de rodadura y carcasa, etc. Sin embargo, esta primera evaluación en rodillo de entrenamiento, como muestra la Figura 15, y en uso real por ciudad y campo, han dado como resultado una rueda que no presenta diferencias significativas en su funcionamiento con respecto a una convencional.



Figura 15. Imagen del prototipo rodando sobre un rodillo de entrenamiento. A simple vista, la diferencia con un neumático convencional es inapreciable, únicamente se aprecia un mayor diámetro.

Cabe destacar que no se ha desplazado la banda de rodadura en ningún momento de su colocación sobre la unión metálica sobre la carcasa, ni rodando sobre asfalto ni sobre caminos irregulares.

3. Diseño del iECOTIRE

Como se ha detallado a lo largo del artículo, estas líneas de investigación encajan en un único concepto de neumático instrumentado y sostenible, mejorando la seguridad, la obtención de información del pavimento, aumentando la vida útil de la carcasa y reduciendo la generación de residuos tanto en la fabricación como a lo largo de la vida útil de la banda de rodadura. Para ello, en este momento se está avanzando en varios puntos del proyecto iECOTIRE.

3.1. Instrumentación de bajo coste embarcada en el neumático

Para generalizar el uso del neumático inteligente ha de incluirse instrumentación fiable y de bajo coste. Teniendo en cuenta estas premisas se trabaja en el

desarrollo de un sistema que permita generar energía, un equipo de adquisición de datos, formado por las galgas extensométricas y un microcontrolador, y un sistema de transmisión de datos formado por un emisor y un receptor de radiofrecuencia, tal y como se esquematiza en la Figura 16.

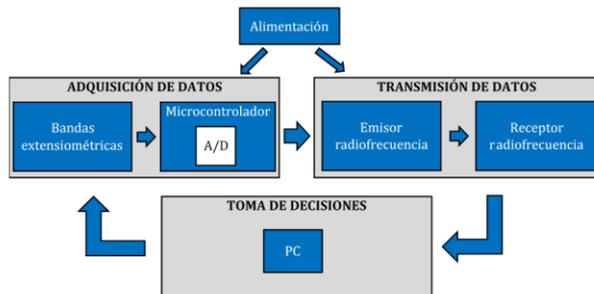


Figura 16. Diagrama del sistema de instrumentación de bajo coste.

En lo relativo al suministro de energía, se han analizado tanto generadores capacitivos como piezoeléctricos. En ambos casos los cambios en energía mecánica provocan cambios geométricos en el generador, que se traducen en un aumento en la carga eléctrica. Sin embargo, los sensores piezoeléctricos (en especial los basados en polímeros) parecen ser los más adecuados para desarrollar el "neumático inteligente". Este generador podría instalarse en la propia carcasa del neumático, generando energía de manera continuada a partir de las propias deformaciones del neumático durante su funcionamiento.

La siguiente etapa de la instrumentación del neumático es el diseño de un sistema de adquisición de datos. Para ello se está estudiando una solución basada en el uso de un microprocesador capaz de adquirir datos a la frecuencia de muestreo necesaria, enviando los datos posteriormente mediante otro dispositivo al exterior del neumático.

Esta comunicación con el vehículo compone el tercer eslabón de la instrumentación embarcada en el neumático. Para ello se ha propuesto el diseño de un sistema de transmisión inalámbrica de información desde el neumático hasta el vehículo, siendo el más adecuado en este momento el sistema de comunicación pasiva basado en dos inductores con acoplamiento magnético a través de la identificación de una determinada frecuencia.

3.2. Carcasa de larga duración

Las carcasas actuales presentan una vida útil muy superior a la que se aprovecha habitualmente. En la mayor parte de los casos se desecha por desgaste en la banda de rodadura, estando la carcasa en perfecto estado para continuar funcionando muchos más kilómetros. El principal motivo de pérdida de características mecánicas a lo largo del tiempo es la degradación oxidativa por la radiación UV del caucho

(la matriz) en el que quedan embebidos los materiales de refuerzo. Es por este motivo que se están analizando diferentes tratamientos superficiales que parten de la activación de la superficie mediante plasma para la posterior adición de un recubrimiento que proteja y prolongue la vida útil de la carcasa. Para esto último, el uso de silanos con aditivos presenta una protección efectiva frente a la radiación UV.

3.3. Banda de rodadura biodegradable

Este punto tiene dos líneas fundamentales: la unión de la banda de rodadura con la carcasa, mediante uniones mecánicas, y el desarrollo de bandas de rodadura con materiales biodegradables. En este último aspecto están trabajando empresas especializadas con las que ya estamos colaborando para aplicar los materiales que mejor encajen con los objetivos de sostenibilidad [9]. En cuanto a uniones mecánicas, además de las metálicas ya utilizadas en el prototipo inicial, se están estudiando soluciones mediante geometrías a ambos lados de la interfase que permitan un cierre de forma por aplicación únicamente de presión de inflado en el neumático.

4. Conclusiones

En este artículo se han explicado las tecnologías aplicadas y la viabilidad de un nuevo concepto de neumático: iECOTIRE. También se ha explicado el estado de desarrollo en el que se encuentran todas las soluciones a integrar en este nuevo neumático y los desarrollos por realizar para completar un prototipo funcional, ver Figura 17.



Figura 17. Pilares del proyecto I-ECOTIRE que integra neumático inteligente con carcasa de larga duración y banda de rodadura removible de materiales biodegradables.

5. Agradecimientos

Acción financiada por la Comunidad de Madrid a través de la línea de "Excelencia del Profesorado Universitario" del Convenio Plurianual con la UC3M (EPUC3M20), en el marco del V PRICIT (V Plan

Regional de Investigación Científica e Innovación Tecnológica)

6. Referencias

- [1] A.J. Tuononen, Optical position detection to measure tyre carcass deflections, *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 46, pp. 471–481, 2008
- [2] J. Yi, A Piezo-Sensor-Based “Smart Tire” System for Mobile Robots and Vehicles, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 13, no. 1, pp. 95-103, 2008
- [3] G. Erdogan and L Alexander and R.Rajamani, A novel wireless piezoelectric tire sensor for the estimation of slip angle, *Measurement Science and Technology*, vol. 22, no. 1, pp. 10, 2009
- [4] Warit Jawjit, C. Kroeze and Suwat Rattanapan, “Greenhouse gas emissions from rubber industry in Thailand”, *Journal of Cleaner Production* 18(5):403-411, 2010.
- [5] B.A.R. Environmental Inc. “Evaluation of the potential toxicity of automobile tires in the aquatic environment”. Report to Environment Canada. National Water Institute. Burlington, Ontario. 15p. 1992.
- [6] Tik Root, “Tires: The plastic polluter you never thought about”, *Environment. The story of plastic.* National Geographic. September 20, 2019.
- [7] Car tyres are major source of ocean microplastics. *The Guardian*, 14/07/2020
- [8] Gaining traction, losing tread Pollution from tire wear now 1,850 times worse than exhaust emissions, *Emissions Analytics (emissions testing company)*, 10/04/2022
- [9] Vipal Cauchos, “El uso de la cáscara de arroz en la producción de caucho”, 14/01/2021
- [10] Continental, “Continental tire made of Dandelion rubber wins German Sustainability Awards”, 14/12/2022
- [11] Gui-Yang Li and J.L. Koenig, “A review of rubber oxidation”, *Rubber Chemistry and Technology*, 78 (3): 355-390 (2005)
- [12] Pacejka, H.B. *Tire and Vehicle Dynamics* (2nd Edition), Butterworth-Heinemann (2005)
- [13] D. Garcia-Pozuelo, O. Olatunbosun, J. Yunta, X. Yang, and V. Diaz, “A Novel Strain-Based Method to Estimate Tire Conditions Using Fuzzy Logic for Intelligent Tires”, *Sensors*, Feb. 2017
- [14] D. Garcia-Pozuelo, J. Yunta, O. Olatunbosun, X. Yang, and V. Diaz, “A Strain-Based Method to Estimate Slip Angle and Tire Working Conditions for Intelligent Tires Using Fuzzy Logic”, *Sensors*, Abr. 2017
- [15] J. Yunta, D. Garcia-Pozuelo, V. Diaz, O. Olatunbosun, “A Strain-Based Method to Detect Tires’ Loss of Grip and Estimate Lateral Friction Coefficient from Experimental Data by Fuzzy Logic for Intelligent Tire Development”, *Sensors*, Feb. 2018
- [16] J. Yunta, D. Garcia-Pozuelo, V. Diaz, O. Olatunbosun, “Influence of camber angle on tire tread behavior by an on-board strain-based system for intelligent tires,” *Measurement*, vol. 145, Oct. 2019
- [17] M. F. Mendoza-Petit, D. García-Pozuelo, V. Díaz, O. Olatunbosun, “A Strain-Based Intelligent Tire to Detect Contact Patch Features for Complex Maneuvers,” *Sensors*, vol. 20, no. 6, Mar. 2020
- [18] M. F. Mendoza-Petit, D. García-Pozuelo, V. Díaz, M. Garrosa, “Characterization of the loss of grip condition in the Strain-Based Intelligent Tire at severe maneuvers”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 168 (2022)
- [19] Ignacio Requena Rodríguez (Advantaria), “La rueda se reinventa. Verde en todos los sentidos”, *Tecnologías Emergentes, Boletín de Observación Tecnológica en Defensa* n°67 (2020)
- [20] Ignacio Requena Rodríguez y Juan Manuel Pérez Ventura. Advantaria. Patente de Invención ES 2 687 105 B1. Rueda mixta para vehículos de dos ruedas con seguridad aumentada (2019)